

ANDRÉ ALVES DE RESENDE

UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DOS
PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO PROCESSO
PLASMA-MIG COM ELETRODOS CONCÊNTRICOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2009

ANDRÉ ALVES DE RESENDE

**UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE
SOLDAGEM DO PROCESSO PLASMA-MIG COM ELETRODOS
CONCÊNTRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi

UBERLANDIA - MG

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R433c Resende, André Alves de, 1982-

Uma contribuição à análise dos parâmetros de soldagem do processo plasma-MIG com eletrodos concêntricos / André Alves de Resende. - 2009.

153 f. : il.

Orientador: Valtair Antônio Ferraresi.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Soldagem - Teses. I. Ferraresi, Valtair Antônio II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.791

ANDRÉ ALVES DE RESENDE

UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO
PROCESSO PLASMA-MIG COM ELETRODOS CONCÊNTRICOS

Dissertação _____ pelo Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi – UFU – Orientador

Prof. Dr. Américo Scotti – UFU – Membro

Prof. Dr. Jair Carlos Dutra – UFSC – Membro

Uberlândia, __ de _____ de 2009

Aos meus pais, Joaquim Carlos e Maria Aparecida.

À minha irmã, Tatiana.

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Prof. Valtair Antônio Ferraresi, pela orientação e profissionalismo demonstrado nestes anos de trabalho e que em muito contribuiu para o meu aperfeiçoamento;
- Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, pela oportunidade de realização deste trabalho. Agradecimento especial ao coordenador Marcio Bacci e a secretária Kelly;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro;
- À FAPEMIG, através do projeto TEC 1763/06 pelo financiamento da infra-estrutura;
- Ao Laprosolda/UFU pelo apoio técnico e laboratorial, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho;
- Ao Prof. Américo Scotti pela contribuição na discussão dos resultados, pelos ensinamentos, apoio e amizade;
- Ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho pelo apoio a realização desse trabalho, pelos ensinamentos, incentivo e amizade;
- Ao Eng. Raul Gohr Jr. da empresa IMC - Soldagem pelo apoio técnico;
- À equipe do Labsolda/UFSC pelo apoio técnico;
- A os amigos e amigas do Laprosolda. Agradecimento especial ao Alexandre Saldanha, Daniel Souza, Demóstenes, José Vargas, Marco Antônio, Vinicius Castanheira e Ruham, que contribuíram diretamente na realização deste trabalho;
- Aos alunos bolsistas de iniciação científica Ricardo e Maxwell;
- Aos meus familiares pelo incentivo e apoio;
- Aos amigos e amigas pelas horas de descontração;
- Aos técnicos da oficina Carlão, Lazineho, Passarinho e Reginaldo.

SUMÁRIO

<i>Lista de Figuras</i>	<i>xi</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>xvii</i>
<i>Simbologia</i>	<i>xix</i>
<i>Resumo</i>	<i>xxi</i>
<i>Abstract</i>	<i>xxii</i>

CAPÍTULO I

Introdução	1
-------------------------	----------

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica	5
2.1 Histórico	5
2.2 Processo de soldagem a Plasma (PAW)	8
2.3 Processo de soldagem MIG/MAG	11
2.3.1 <i>Introdução</i>	11
2.3.2 <i>Modos de transferência metálica</i>	12
2.4 Processo de soldagem Plasma-MIG	15
2.4.1 <i>Introdução</i>	15
2.4.2 <i>Princípios de operação</i>	16
2.4.3 <i>Tipos de Plasma-MIG quanto ao formato e posicionamento do eletrodo Plasma</i>	17
2.4.4 <i>Acendimento do arco Plasma</i>	19
2.4.5 <i>Gases para o processo Plasma-MIG</i>	21
2.4.6 <i>Transferência de calor e geometria do cordão no processo Plasma-MIG</i>	22
2.4.7 <i>Transferência metálica no processo Plasma-MIG</i>	24

CAPÍTULO III

Equipamentos e Metodologia Experimental	29
3.1 Bancada experimental	29

3.1.1 Fontes de soldagem para o processo Plasma-MIG	30
3.1.2 Tocha Plasma-MIG	31
3.1.3 Sistema de alimentação do arame eletrodo	33
3.1.4 Unidade de controle microprocessada (Cabeçote + Programa "P-MIG").	35
3.1.5 Sistema de refrigeração	36
3.2 Robô	39
3.3 Equipamentos de filmagem	40
3.4 Consumíveis	42
3.4.1 Gases	42
3.4.2 Metal de adição	42
3.4.3 Metal de base	43
3.5 Sistemas de aquisição e tratamento de dados	44
3.6 Metodologia de soldagem	46

CAPÍTULO IV

Montagem do Equipamento de Soldagem Plasma/MIG no Laboratório e

Testes Preliminares	49
4.1 Principais dificuldades em utilizar o processo Plasma-MIG	49
4.1.1 Problemas na abertura do arco	50
4.1.2 Extinção do arco Plasma	51
4.1.3 Instabilidade do processo Plasma-MIG	52
4.1.4 Refrigeração deficiente do eletrodo Plasma	53
4.2 Testes de soldabilidade	55
4.3 Considerações finais do capítulo	58

CAPÍTULO V

Influência das Correntes Plasma e MIG/MAG Sobre a Geometria do

Cordão de Solda	61
5.1 Procedimento experimental	61
5.2 Resultados	63
5.3 Análise em função da energia total por unidade de comprimento de solda	66
5.4 Análise em função das correntes Plasma e MIG/MAG	72
5.5 Considerações finais do capítulo	78

CAPÍTULO VI

Transferência Metálica e Geometria de Cordão em Soldagem Plasma-MIG

Com Pulsção da Corrente MIG/MAG	81
6.1 Procedimento experimental	81
6.2 Análise da transferência metálica na soldagem Plasma-MIG com pulsção da corrente no circuito MIG/MAG	82
6.3 Análise das características elétricas	90
6.4 Geometria do cordão de solda na soldagem Plasma-MIG com pulsção da corrente MIG/MAG	91
6.5 Considerações finais do capítulo	95

CAPÍTULO VII

Aspectos Operacionais do Processo Plasma-MIG	97
7.1 Influência da corrente plasma na velocidade máxima de soldagem	97
7.2 Comportamento do cordão na soldagem Plasma-MIG em chanfros estreitos .	104
7.3 Comparação entre a utilização do arame tubular auto-protegido na tocha MIG/MAG convencional e Plasma-MIG	109
7.4 Considerações finais do capítulo	115

CAPÍTULO VIII

Conclusões	117
-------------------------	------------

CAPÍTULO IX

Propostas Para Trabalhos Futuros	119
---	------------

CAPÍTULO X

Referências Bibliográficas	121
---	------------

ANEXO A

Guia de Operação do Processo Plasma-MIG no Laprosolda/UFU	127
A.1 Objetivo	127
A.2 Equipamentos essenciais	127
A.3 Tocha Plasma-MIG	130

A.4 Fontes de soldagem	131
A.4.1 Cabos de corrente	131
A.4.2 Mangueiras para gases	131
A.4.3 Refrigeração para o processo	131
A.4.4 Modos de operação	132
A.5 Medidores de vazão	133
A.6 Sistema de água gelada	133
A.7 Sistema de controle	135
A.7.1 Instalação	135
A.7.2 Operação	137

ANEXO B

Guia Para Medição de Parâmetros Geométricos de Cordão de Solda	
Através do Programa ImajeJ	141
B.1 Introdução	141
B.2 Utilizando o Programa ImageJ	141
B.2.1 Calibração	142
B.2.2 Medição de parâmetros geométricos	143

ANEXO C

Curvas de Calibração	147
C.1 Curva de calibração do cabeçote alimentador	147
C.2 Curva de calibração dos medidores de vazão de gases	148
C.3 Curva de calibração dos sensores Hall (EH)	149
C.4 Curva de calibração dos divisores de tensão (DTS)	150

ANEXO D

Medidas Geométricas Referentes aos Testes do Capítulo V	151
--	------------

ANEXO E

Diagrama de Blocos do Programa “Aquisicao_PM.vi”	153
---	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de um equipamento para soldagem a arco com alta pressão (Adaptado de: YENNI; WILLIAMSVILLE, 1958).	6
Figura 2.2	Esquema de um equipamento para soldagem Plasma-MIG usada em pesquisas nas décadas de 70 e 80 (Adaptada de ESSERS, 1980).	7
Figura 2.3	Linha do Tempo do Surgimento dos Processos de Soldagem Reis e Scotti (2007).	7
Figura 2.4	Visão geral de uma tocha de soldagem a Plasma (RICHETTI, 2003).	8
Figura 2.5	Efeito da corrente de soldagem sobre o perfil de cordão (RICHETTI, 2003).	10
Figura 2.6	Efeito da velocidade de soldagem sobre o perfil de cordão, (RICHETTI, 2003).	10
Figura 2.7	Efeito da vazão do gás de plasma sobre o perfil da solda ($I = 190 \text{ A}$), (RICHETTI, 2003).	10
Figura 2.8	Vista esquemática de um bocal da tocha, arame eletrodo e arco MIG/MAG mais metal de base e metal depositado.	12
Figura 2.9	Modos de transferência em função da corrente para eletrodo ER70S-6, 1,2 mm, DBCP de 18 mm e $\text{Ar} + \text{CO}_2$. (KEOCHEGUERIAN; RESENDE; VILARINHO, 2007).	14
Figura 2.10	Desenho esquemático de uma tocha para soldagem Plasma-MIG, com destaque para os componentes principais (Adaptado de OLIVEIRA; DUTRA, 2007).	17
Figura 2.11	Combinação dos processos Plasma e MIG/MAG em um único processo. 1 – Peça de Trabalho; 2 – Jato de Plasma; 3 – Bocal Plasma; 4 – Poça de fusão; 5– Direção da corrente Plasma; 6 – Direção da corrente MIG/MAG; 7 – Ângulo entre os eletrodos; 8 - Eletrodo de tungstênio; 9 – Eletrodo MIG/MAG; 10 – Arco MIG/MAG; 11 – Plasma. Adaptado de Dykhno e Davis (2006).	18
Figura 2.12	Fotografias de alta velocidade do acendimento do arco no processo Plasma-MIG por Curto-Circuito. (a) arame movendo-se em direção a peça; (b) Curto-Circuito; (c) Arame-se dobrando e início da fusão; (d) Acendimento do arco MIG; (e) Acendimento do arco Plasma. Essers et al (1981).	19
Figura 2.13	Esquema de funcionamento do “Soft Start” (Adaptado de: REIS; SCOTTI 2007; OLIVEIRA, 2006 e SLV, 2008).	21
Figura 2.14	Seqüência de fotos do acendimento do arco plasma com identificação das etapas relativas ao “Soft Start” (Adaptado de OLIVEIRA, 2006).	21
Figura 2.15	Energia térmica transferida à peça em função da corrente total fornecida ao sistema. (Adaptado de: ESSERS; WALTER, 1981).	23
Figura 2.16	Soldas com arame de aço inoxidável de 1,2 mm de diâmetro. Velocidades de soldagem a alimentação constantes. Da esquerda para a direita: 155 A e 0 A, 133 A e 30 A, 133A e 100 A de correntes MIG e Plasma respectivamente (JELMORINI et al, 1975).	23
Figura 2.17	Influência do balanço de correntes sobre a geometria do cordão de solda. $V_{\text{sol}} = 0,3 \text{ m/min}$ e $V_{\text{lim}} = 5,3 \text{ m/min}$ para os três ensaios. Oliveira (2006).	24

Figura 2.18	Fotografia de soldagem Plasma-MIG com eletrodos na polaridade negativa. Corrente Plasma de 240 A a 40V e corrente MIG de 155A a 30V. Arame de aço inoxidável de 0,8 mm. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).	25
Figura 2.19	Fotografia de soldagem Plasma-MIG com eletrodos na polaridade positiva. Corrente Plasma de 110 A a 49V e corrente MIG de 150A a 29V. Arame de aço inoxidável de 1,2 mm. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).	25
Figura 2.20	(a) Fotografia de transferência goticular rotacional na soldagem Plasma-MIG com eletrodos na polaridade positiva. Corrente Plasma de 120A a 45V e corrente MIG de 300A a 35V. Arame de aço inoxidável de 0,8 mm. (b) secção transversal do corpo de prova obtido em (a). (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).	26
Figura 2.21	Corrente de transição de goticular-axial para goticular-rotacional e quantidade de respingos para goticular rotacional no processo MIG/MAG para eletrodo de aço ao carbono com 1,2 mm. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).	27
Figura 2.22	Corrente de transição de goticular-axial para goticular-rotacional no processo Plasma-MIG para eletrodo de aço ao carbono com 1,2 mm. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).	27
Figura 2.23	Taxa de deposição em transferência goticular rotacional sem respingos em função do corrente através do arame para diversos comprimentos de eletrodo, indicados para cada ponto. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).	28
Figura 3.1	Fotografia da bancada experimental utilizada.	30
Figura 3.2	Vista esquemática dos principais elementos da tocha Plasma-MIG. 1 – Bico de contato MIG/MAG; 2 – Isolamento cerâmico; 3 – Eletrodo Plasma; 4 – Bocal constritor Plasma; 5 – Bocal Externo.	31
Figura 3.3	Exemplo de uma tocha comercial para o processo Plasma-MIG de fabricação da TBi em vista explodida. 1 - Corpo da tocha; 2 - Eletrodo MIG/MAG; 3 - Eletrodo Plasma; 4 - Bocal constritor; 5 - Bocal externo.	32
Figura 3.4	Vista esquemática do posicionamento dos principais elementos da tocha Plasma MIG. DTP: Distância da Tocha a Peça; RP: Recuo do eletrodo Plasma; RM: Recuo do bico de contato MIG/MAG; DBCP: Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça.	33
Figura 3.5	(A) Vista lateral e (B) vista frontal do cabeçote alimentador.	34
Figura 3.6	(A) Vista frontal e (B) posterior da interface do cabeçote alimentador.	34
Figura 3.7	Tela de apresentação do programa P-MIG, versão 2.21.	36
Figura 3.8	Unidade Móvel de água, Fabricante Mecalor, Modelo: UMAG MAS-9-RI-220.	37
Figura 3.9	Esquema hidráulico da saída e retorno da unidade de água gelada, e esquema elétrico dos sensores de fluxo.	38
Figura 3.10	Vista do “by-pass” com válvula de gaveta e engates rápidos para mangueiras de água.	39
Figura 3.11	Detalhe da tocha Plasma-MIG, suporte e sensor de impacto.	40
Figura 3.12	Esquema do equipamento de filmagem, com destaque à câmera de alta velocidade e a mesa de deslocamento do corpo de prova.	41
Figura 3.13	Corpos de Prova para simples deposição sobre chapa (“bead on plate”). Cotas em mm.	43
Figura 3.14	Corpo de prova para solda em junta chanfrada. Cotas em mm.	44
Figura 3.15	Indicação da posição onde os sinais elétricos de tensão.	44
Figura 3.16	Placa de aquisição tipo “Plug and Play” da National Instruments modelo: NI USB-6009.	45

Figura 3.17	Interface do sistema de aquisição de dados.	46
Figura 3.18	Indicação da região de seccionamento dos corpos de prova, no centro e a 30 mm do fim do cordão.	47
Figura 3.19	Vista dos parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda. Nota: L = Largura, R = Reforço, P=Penetração, AF = Área Fundida, AD = Área Depositada.	47
Figura 4.1	Oscilograma de uma abertura de arco que falhou por falta de tensão na fonte Plasma, com a identificação das etapas relativas ao procedimento de abertura do arco "Soft Start".	50
Figura 4.2	Extinção momentânea do arco Plasma no início do cordão.	52
Figura 4.3	Instabilidades causadas pela migração do arco MIG/MAG para o eletrodo Plasma.	53
Figura 4.4	Eletrodo Plasma danificado pela migração do arco MIG/MAG para o eletrodo Plasma.	53
Figura 4.5	Aspecto de um eletrodo Plasma danificado por deficiência na refrigeração. Da esquerda para direita, eletrodo Plasma antes e após uma seqüência de seis cordões com 160 A de corrente pelo circuito Plasma.	54
Figura 4.6	Imagem da superfície dos corpos de prova.	56
Figura 4.7	Evolução da corrente Plasma. Espessura da chapa: 9,5 mm.	56
Figura 4.8	Parâmetros geométricos lineares em função da corrente Plasma.	57
Figura 4.9	Parâmetros geométricos de área em função da corrente Plasma.	58
Figura 5.1	Fotografia da superfície da chapa referente ao Teste 5.6, com indicação da direção de soldagem e das regiões onde foram realizadas as seções transversais.	64
Figura 5.2	Energia de soldagem por unidade de comprimento de solda em função da velocidade de alimentação para uma mesma quantidade de material depositada por unidade de comprimento e mesmo comprimento de arco. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.	68
Figura 5.3	Energia de soldagem por unidade de comprimento de solda em função da largura do cordão. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.	69
Figura 5.4	Energia de soldagem por unidade de comprimento de solda em função do reforço do cordão. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.	70
Figura 5.5	Energia de soldagem por unidade de comprimento de solda em função da penetração do cordão. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.	71
Figura 5.6	Energia de soldagem por unidade de comprimento de solda em função da área fundida do cordão. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.	71
Figura 5.7	Penetração do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente Plasma.	72
Figura 5.8	Área fundida do metal de base em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente Plasma.	74
Figura 5.9	Largura do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente Plasma.	74
Figura 5.10	Reforço do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente Plasma.	75
Figura 5.11	Área de material depositado na chapa em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente Plasma.	76
Figura 5.12	Diluição em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente Plasma.	77

Figura 5.13	Velocidade de alimentação de arame em função da Corrente MIG/MAG para três condições de corrente Plasma.	78
Figura 6.1	Oscilogramas de corrente e tensão sincronizados com imagens da câmera de alta velocidade sem corrente pelo circuito Plasma. Correspondente ao ensaio 6.1.	83
Figura 6.2	Oscilogramas de corrente e tensão sincronizados com imagens da câmera de alta velocidade com 40 A de corrente pelo circuito Plasma. Correspondente ao ensaio 6.2.	84
Figura 6.3	Modelo elétrico para o processo Plasma-MIG na região do arco híbrido de acordo com Matthles e Kohler (2002).	85
Figura 6.4	Oscilogramas de corrente e tensão sincronizados com imagens da câmera de alta velocidade com 60 A de corrente pelo circuito Plasma. Correspondente ao ensaio 6.3.	86
Figura 6.5	Oscilogramas de corrente e tensão sincronizados com imagens da câmera de alta velocidade com 80 A de corrente pelo circuito Plasma. Correspondente ao ensaio 6.4.	87
Figura 6.6	Oscilogramas de corrente e tensão sincronizados com imagens da câmera de alta velocidade com 100 A de corrente pelo circuito Plasma. Correspondente ao ensaio 6.5.	88
Figura 6.7	Esquema para medição de comprimento de arco.	89
Figura 6.8	Variação no comprimento do arco em função da corrente Plasma.	89
Figura 6.9	Tensão nos circuitos Plasma e MIG/MAG em função da corrente Plasma.	90
Figura 6.10	Tensões de pulso, de base e média do circuito MIG/MAG em função da corrente Plasma.	91
Figura 6.11	Parâmetros geométricos lineares para a soldagem Plasma-MIG, com corrente MIG/MAG Pulsada em função da corrente Plasma.	94
Figura 6.12	Parâmetros geométricos quadráticos para a soldagem Plasma-MIG, com corrente MIG/MAG pulsada em Função da Corrente Plasma.	94
Figura 6.13	Diluição para a soldagem Plasma-MIG, com corrente MIG/MAG pulsada em função da corrente Plasma.	95
Figura 7.1	Vista superior (a) e lateral (b) de um cordão de solda com “Humping”.	98
Figura 7.2	Representação esquemática da velocidade crítica de soldagem para comprimentos de arcos variáveis em função da corrente Plasma. Correspondentes aos testes 7.1 a 7.8.	102
Figura 7.3	Representação esquemática da velocidade crítica de soldagem para comprimentos de arcos curtos. Correspondentes aos testes 7.1 a 7.3 e 7.9 a 7.14.	103
Figura 7.4	Cordões com aspecto regular (a) e irregular (b) nas condições de MIG/MAG pulsado de Pereira (2000). Testes 7.15 e 7.19 respectivamente.	105
Figura 7.5	Aspecto do cordão relativo ao ensaio 7.17 com destaque a excessiva convexidade.	106
Figura 7.6	Seções transversais relativas aos ensaios 7.16 ao 7.18, na ordem. ..	106
Figura 7.7	Esquema de direcionamento das gotas pelo arco Plasma.	107
Figura 7.8	Influência do ângulo de abertura do chanfro sobre a irregularidade do cordão. Uma comparação entre resultados de Pereira (2000) soldando com o processo MIG/MAG e o processo Plasma-MIG.	108
Figura 7.9	Seção transversal dos ensaios 7.25 e 7.26. (a) 60 A de corrente Plasma e (b) 140 A.	109

Figura 7.10	Imagem da superfície das chapas soldadas com arame tubular auto-protegido utilizando tocha MIG/MAG convencional sem fornecimento de fluxo de gás adicional. As setas indicam a presença de trincas transversais. Testes 7.27 e 7.28.	111
Figura 7.11	Imagem da superfície das chapas soldadas com arame tubular auto-protegido utilizando tocha MIG/MAG convencional com fornecimento de fluxo de gás adicional. As setas indicam a presença de trincas transversais. Testes 7.29 e 7.30.	112
Figura 7.12	Imagem da superfície das chapas soldadas com arame tubular auto-protegido utilizando tocha Plasma-MIG e corrente no circuito Plasma de 120 A. As setas indicam a presença de trincas transversais. Testes 7.31 e 7.32.	113
Figura 7.13	Aspecto do bocal da tocha Plasma-MIG (a) e do eletrodo Plasma (b), após a realização dos dois testes.	113
Figura 7.14	Medidas lineares para as seções transversais dos cordões de solda obtidos para arame tubular auto-protegido utilizando a tocha Plasma-MIG, MIG/MAG convencional e MIG/MAG convencional com proteção gasosa extra.	114
Figura 7.15	Medidas quadráticas para as seções transversais dos cordões de solda obtidos para arame tubular auto-protegido utilizando a tocha Plasma-MIG, MIG/MAG convencional e MIG/MAG convencional com proteção gasosa extra.	114
Figura 7.16	Medidas de diluição do cordão de solda no metal de base para as seções transversais obtidas para arame tubular auto-protegido utilizando a tocha Plasma-MIG, MIG/MAG convencional e MIG/MAG convencional com proteção gasosa extra.	115
Figura A.1	Bancada experimental esquemática.	128
Figura A.2	Fotografia da bancada experimental utilizada.	129
Figura A.3	Esquema de montagem da tocha Plasma-MIG no punho do robô. ...	130
Figura A.4	Esquema de montagem dos cabos de corrente, gases e de refrigeração no painel do alimentador.	131
Figura A.5	Esquema para “curto-circuitar” o sistema de refrigeração das fontes..	132
Figura A.6	Cabos de controle conectados as fontes MIG/MAG (A) e Plasma (B).	132
Figura A.7	Medidores de vazão (A) e reguladores de pressão (B).	133
Figura A.8	Sistema de água gelada.	134
Figura A.9	Sistema de distribuição de água gelada com válvula de gaveta para controle de vazão (A) e válvula para fornecimento de água de reposição (B).	134
Figura A.10	Painel do sistema de água gelada.	135
Figura A.11	Sensores de fluxo.	136
Figura A.12	Vista frontal (A) e traseira (B) da interface do cabeçote alimentador. .	136
Figura A.13	Posicionamento dos conectores no computador de controle.	137
Figura A.14	Tela de apresentação do programa P-MIG, versão 2.21.	138
Figura B.1	Barra de Ferramentas do programa ImageJ.	142
Figura B.2	Programa ImageJ com imagem de calibração aberta.	142
Figura B.3	Janela de Calibração.	143
Figura B.4	Referenciamento da superfície da chapa.	143
Figura B.5	Janela com resultados de medidas lineares.	144
Figura B.6	Janela com resultados de medidas quadráticas.	145
Figura C.1	Curva de calibração do cabeçote alimentador.	147
Figura C.2	Curva de calibração do medidor de vazão MV-04.	148
Figura C.3	Curva de calibração do medidor de vazão MV-03.	148
Figura C.4	Curva de calibração do indicador de vazão do regulador de pressão.	148
Figura C.5	Curva de calibração do Sensor Hall - EH 3.	149

Figura C.6	Curva de calibração do Sensor Hall - EH 1.	149
Figura C.7	Curva de calibração do Divisor de Tensão - DTS 3	150
Figura C.8	Curva de calibração do Divisor de Tensão - DTS 2.	150
Figura E.1	Diagrama de Blocos do Programa “Aquisicao_PM.vi”. Em colaboração com M.Sc Eng. Vinicius Castanheira.	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Recente Proposta de Classificação para os modos de transferência Metálica. Adaptado de Vilarinho (2007).	13
Tabela 3.1	Gases a serem utilizados no desenvolvimento deste trabalho.	42
Tabela 4.1	Ajustes das condições de soldagem para os testes iniciais.	56
Tabela 4.2	Parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda.	57
Tabela 5.1	Ajustes das condições de soldagem para os testes iniciais.	62
Tabela 5.2	Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos Plasma e MIG/MAG.	63
Tabela 5.3	Fotografias das seções transversais de cada corpo de prova, as imagens mostradas são referentes à seção mais próxima ao fim do cordão. Chapas com 6,35 mm de espessura.	63
Tabela 5.4	Parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda.	65
Tabela 5.5	Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.	66
Tabela 5.6	Potência Consumida e Energia de Soldagem.	67
Tabela 6.1	Ajustes das condições de soldagem para os testes com corrente MIG/MAG Pulsada.	82
Tabela 6.2	Imagens dos corpos de prova com suas respectivas seções transversais.	92
Tabela 6.3	Parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda.	93
Tabela 6.4	Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.	93
Tabela 7.1	Ajustes das condições de soldagem para os testes.	99
Tabela 7.2	Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos Plasma e MIG/MAG e aceitabilidade dos cordões.	100
Tabela 7.3	Ajustes das condições de soldagem para os testes.	105
Tabela 7.4	Identificação de tocha e gás de proteção para os testes.	111
Tabela D.1	Medidas geométricas referentes aos testes do capítulo V.	151

SIMBOLOGIA

AD	- Área de metal depositado;
AF	- Área fundida no metal de base;
ANOVA	- Análise de variância;
CC+	- Corrente contínua polaridade positiva ou inversa;
CO₂	- Dióxido de carbono;
Cu	- Cobre;
DBCP	- Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça;
DTP	- Distância da Tocha a Peça;
Fe	- Ferro;
GDL	- Graus De Liberdade;
I	- Corrente;
I_{arit}	- Corrente média;
I_b	- Corrente de base;
I_i	- Corrente instantânea;
I_{MIG}	- Corrente MIG/MAG;
I_p	- Corrente de pulso;
I_{PLASMA}	- Corrente Plasma;
I_{RMS}	- Corrente eficaz;
L	- Largura do cordão de solda;
L_{arco}	- Comprimento do arco;
LP	- Líquido Penetrante;
MIG/MAG	- Metal Inert Gas / Metal Active Gas;
P	- Penetração do cordão de solda;
p	- Nível de significância;
P_{arit}	- Potência Média Aritmética;
PAW	- Plasma Arc Welding;
P_{inst}	- Potência Instantânea;
P_{InstRMS}	- Potência Instantânea RMS;
Plasma-MIG	- Plasma - Metal Inert Gas / Metal Active Gas;
P_{RMS}	- Potência eficaz;
qps	- Quadros Por Segundo;
R	- Reforço do cordão de solda;
RM	- Recuo do bico de contato MIG/MAG;
RP	- Recuo do eletrodo Plasma;
t_b	- Tempo de base;
t_p	- Tempo de pulso;
U_{arit}	- Tensão média;
UGPP	- Uma Gota Por Pulso;
U_i	- Tensão instantânea;
U_{MIG}	- Tensão MIG/MAG;
U_{PLASMA}	- Tensão Plasma;
U_{RMS}	- Tensão eficaz;
Valim	- Velocidade de alimentação;
Vsold	- Velocidade de soldagem.

RESENDE, A. A. 2009. **Uma Contribuição à Análise dos Parâmetros de Soldagem do Processo Plasma-MIG com Eletrodos Concêntricos**. 153 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Resumo

O processo de soldagem Plasma-MIG tem ressurgido nos últimos anos para atender a crescente demanda do mercado por processos cada vez mais competitivos. Plasma-MIG faz parte dos chamados “*Processos Híbridos de Soldagem*”, nos quais são associados ao menos dois outros convencionais de forma a obter características não possíveis com processos singulares. Nos processos híbridos, normalmente a associação é feita entre um processo com alimentação contínua de material e um processo autógeno, tendo como principal vantagem, uma maior independência entre a quantidade de material transferido e a energia total utilizada no processo. Apesar de a literatura corrente citar as vantagens e potencialidades no uso do Plasma-MIG, ainda não é conhecido a sua utilização em nível industrial no Brasil. Com o desenvolvimento deste trabalho, o grupo de pesquisas Laprosolda da UFU inicia sua linha de pesquisas em soldagem Plasma-MIG, no sentido de contribuir para o desenvolvimento do processo. Desta forma, os objetivos deste trabalho consistem na implantação do processo no Laprosolda, na ampliação dos conhecimentos sobre a sua utilização e aplicação, na avaliação do perfil do cordão de solda para diferentes combinações de correntes nos circuitos Plasma e MIG/MAG, na avaliação da influência da corrente Plasma na taxa de fusão do eletrodo consumível, na verificação de alguns aspectos sobre a transferência metálica, além da sugestão de algumas aplicações e propostas de temas para trabalhos futuros sobre o processo Plasma-MIG. Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma tocha Plasma-MIG com eletrodos concêntricos, fontes de soldagem dedicadas, sistema de refrigeração com controle sobre a temperatura, sistema que aquisição de sinais elétricos e de filmagem a alta velocidade. Os resultados mostraram que é possível atuar sobre a geometria dos cordões de solda por meio da variação das correntes nos circuitos Plasma e MIG/MAG. Existe uma independência entre a energia de soldagem e a quantidade de material depositado, o aumento da corrente Plasma diminui a diluição do cordão de solda. Existe também uma interação elétrica entre os circuitos Plasma e MIG/MAG de forma a influenciar na transferência metálica.

Palavras-chave: Plasma-MIG, Híbrido, Geometria, Energia, Soldagem.

RESENDE, A. A. 2009. **A Contribution to Parameters Analysis of the Plasma-MIG Welding Process with Concentric Electrodes**. 153 f. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia - MG.

Abstract

The constant market demand for competitive welding processes during the latest years has raised the development of new process, among them the Plasma-MIG welding. The Plasma-MIG process figures among the so called "*Hybrids Welding Processes*", in which at least two other conventional processes are associated to obtain operational characteristics that would be impossible with other welding processes. In hybrid processes usually the association is made by using a process with uninterrupted material feeding and an autogenous process. The main advantage of such approach is the high independence between the material feeding rate and the total energy used in the process. Although the current literature mentions the benefits and potential applications for the Plasma-MIG process, there has not been found any report of its use in the Brazilian industry. In order to change this scenario, new research efforts on this process have been initiated by the Laprosolda/UFU working group. This work intends to identify and solve the main difficulties in using the process, evaluate the weld bead shape for different current combinations in the Plasma and the MIG/MAG circuits, asses the Plasma current influence on the MIG/MAG electrode melting rate, check some aspects of metal transfer and suggest some potential applications. Eventually, suggestions for future work with this welding process are proposed. The experiments were carried out using a Plasma-MIG torch with concentric electrodes, two dedicated power sources, a process control interface, a cooling system with temperature control, an electrical data acquisition system and a synchronized high speed filming method. The results indicated that it is possible to act on the weld bead geometry by setting the right currents for the Plasma and the MIG/MAG circuits and there is independence between the welding power and the amount of deposited material. In addition, by increasing the Plasma current it is possible to decrease the dilution of the weld bead in the base metal. Finally, it is worth mentioning that there is an interaction between the Plasma and the MIG/MAG electrical circuits and a resultant influence on the metal transfer.

Keywords: Plasma-MIG, Hybrid, Geometry, Energy, Welding.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com os avanços de novas tecnologias disponíveis para o desenvolvimento de processos de soldagem e a procura por processos com maior capacidade de produção e produtividade, surgiram os chamados “Processos Híbridos de Soldagem”. Trata-se da associação física de dois processos, com o objetivo de aproveitar as melhores características de cada um deles (REIS; SCOTTI, 2007).

De acordo com Harris (1994a), o processo de Soldagem Plasma-MIG é definido como a combinação dos processos Plasma e MIG/MAG em uma única tocha, onde o metal de adição é alimentado pelo orifício do bocal plasma. Esta combinação resulta em um processo com alimentação contínua de metal, que possibilita soldagens de alta produção, com um controle maior sobre a geometria do cordão, entretanto necessita de um maior rigor na preparação das juntas

Apesar dos primeiros estudos sobre o processo Plasma-MIG terem sido iniciados na década de 70 nos laboratórios de pesquisa da Philips (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972), em Eindhoven, nos Países Baixos, e continuados até a década de 80, ele não foi capaz de compor a lista de processos viáveis para a indústria da época. Isso porque os equipamentos disponíveis, não eram capazes de promover um controle adequado sobre a soldagem, motivo pelo qual o processo ficou esquecido por um tempo.

Com a nova geração de equipamentos, aliada a capacidade de promover um controle eficiente sobre o processo de soldagem a um preço mais acessível, possibilitando desta forma, a retomada de interesse pelo processo Plasma-MIG, que está se apresentando como viável para o setor produtivo. Por este motivo, ele é considerado como um processo recente, mesmo já tendo sido estudado anteriormente. Esses e outros novos processos de soldagem estão ganhando destaque devido ao surgimento de aplicações cada vez mais

específicas em que os processos tradicionalmente utilizados já não são mais capazes de atender os requisitos de qualidade e produtividade exigidos pelo setor produtivo.

Na última década, o processo Plasma-MIG mostrou ser uma alternativa viável para a indústria, tanto para operações de soldagem, quanto para revestimentos e tem sido objeto de estudo em diversos institutos de pesquisas pelo mundo, com destaque aos institutos alemães SLV, IFS e ISAF (OLIVEIRA, 2006; REIS; SCOTTI, 2007). Também desenvolvem estudos o Instituto de Pesquisas em Soldagem, da Universidade de Osaka, no Japão (TANAKA et al., 2008), a Universidade Tecnológica Estadual Priazovsky, na Ucrânia (MAKARENKO; GRANOVSKY; KONDRASHOV, 2001). Outro grupo que tem se destacado é o PLT (Plasma Laser Technologies), também com sede na Alemanha e ramificações nos EUA e em Israel, o diferencial deste grupo é que além das pesquisas, realizam a comercialização do produto para as indústrias (DYKHNO; DAVIS, 2006).

Um fator interessante a ser observado, é que o processo está sendo estudado em seus diversos aspectos e para aplicações distintas, o que reforça o seu grande potencial em ocupar um lugar significativo na indústria, como por exemplo, nos institutos de pesquisa da Alemanha, são desenvolvidas tecnologias em soldagem e revestimento de chapas galvanizadas, de alumínio e aço carbono, inclusive tendo a participação de Oliveira (2006) da UFSC. Na Ucrânia, Chigarev et al. (2001) e Makarenko; Granovsky; Kondrashov (2001) estão utilizando o processo para operações de revestimento com a utilização de arames tubulares. No Japão, Tanaka et al. (2008) estudaram o comportamento da transferência metálica e do arco híbrido com pulsação da corrente MIG/MAG e observaram um ganho considerável de estabilidade, além da possibilidade de utilizar correntes mais baixas no circuito MIG/MAG.

Apesar das vantagens e potencialidades do uso do Plasma-MIG, ainda não se tem notícias da sua utilização em nível industrial no Brasil. Do ponto de vista de desenvolvimento nacional, o grupo Labsolda da UFSC foi o pioneiro a explorar este processo, desenvolvendo estudos fenomenológicos do processo e das interações de suas variáveis, obtendo bons resultados tanto na soldagem de alumínio e aço carbono, quanto na brasagem de chapas galvanizadas. Este grupo, que também é referência no desenvolvimento de equipamentos de soldagem para a indústria e, principalmente, centros de pesquisas, desenvolveu um cabeçote especial e um software para o comando do processo.

Em 2008, o grupo Laprosolda da UFU (Universidade Federal de Uberlândia), com apoio do grupo Labsolda e da empresa TBI, inicia sua linha de pesquisas em soldagem Plasma-MIG, no sentido de também contribuir para o seu desenvolvimento. Equipamentos foram adquiridos para formar conjunto dedicado, que incluem um robô, uma fonte MIG/MAG, uma fonte Plasma, um cabeçote especial para o processo e uma tocha para a soldagem

Plasma-MIG. Este conjunto, somado à infra-estrutura já presente no laboratório, principalmente no tocante à monitoração sofisticada dos dados elétricos e a filmagens a alta velocidade dos fenômenos que acontecem no arco de solda pela técnica “Perfilográfica”, permitindo que novos conhecimentos sejam gerados. A proposta do grupo Laprosolda é de que sejam repassados para futuros usuários, novos parâmetros e condições para que a aplicação do processo nas indústrias se torne viável.

Os objetivos do desenvolvimento desta dissertação consistem na implantação do processo Plasma-MIG no Laprosolda/UFU, seguida de uma avaliação de alguns aspectos básicos relativos ao processo, que servirão como base para investigações futuras mais detalhadas, uma vez que a quantidade de estudos e informações atualizadas ainda é limitada. Também fazem parte dos objetivos a identificação das limitações e propor melhorias ao processo. Obter conhecimentos básicos sobre a sua utilização e aplicação. Avaliar o perfil do cordão de solda para diferentes combinações de correntes nos circuitos Plasma e MIG/MAG. Avaliar a influência da corrente Plasma na taxa de fusão do eletrodo consumível, verificar alguns aspectos sobre a transferência metálica além de sugerir algumas aplicações e propor temas para trabalhos futuros sobre o processo Plasma-MIG.

Com o intuito de documentar os resultados deste estudo, a apresentação desta dissertação se divide em 10 capítulos.

O Capítulo II detalha os fundamentos básicos necessários para o desenvolvimento do trabalho, de acordo com a literatura disponível. É apresentada também uma contextualização histórica do surgimento do processo Plasma-MIG, seguido de uma abordagem geral dos processos que o originaram, Plasma e MIG/MAG. Na seqüência, uma revisão sobre os aspectos do processo Plasma-MIG que são relevantes à execução deste trabalho, como acendimento do arco, gases de proteção, transferência metálica, transferência de calor, geometria do cordão de solda e aplicações do processo.

No Capítulo III é apresentada uma descrição dos consumíveis e dos equipamentos utilizados, além de descrever a metodologia utilizada para as etapas que foram realizadas durante a fase experimental do trabalho.

No Capítulo IV são apresentadas as principais dificuldades encontradas ao trabalhar com o processo Plasma-MIG, bem como recomendações para minimizar ou eliminar tais dificuldades, seguido de um conjunto de testes preliminares que indicaram os caminhos para o prosseguimento do trabalho.

No Capítulo V é realizada uma análise sobre a influência do balanço das correntes nos circuitos Plasma e MIG/MAG sobre a geometria do cordão de solda.

No Capítulo VI é realizada a análise de alguns aspectos relacionados à transferência metálica no processo Plasma-MIG com pulsação da corrente no circuito MIG/MAG.

No Capítulo VII é avaliado o comportamento do processo Plasma-MIG na soldagem de juntas estreitas, é avaliada a influência da corrente Plasma sobre a velocidade de soldagem imediatamente antes que ocorra o “Humping”, e também é avaliada a utilização de arame tubular auto-protegido na tocha de soldagem para o processo Plasma-MIG.

Finalmente, o Capítulo VIII é dedicado às conclusões do trabalho, o Capítulo IX às propostas para trabalhos futuros enquanto o Capítulo X apresenta as referências bibliográficas utilizadas, que é seguido de cinco ANEXOS, que consistem em um guia de execução do processo Plasma-MIG no Laprosolda/UFU, guia para medir geometria de corpos de prova e curvas de calibração dos equipamentos utilizados, tabelas e diagrama do programa de aquisição de dados elétricos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica tem como finalidade reunir informações a respeito do processo de soldagem Plasma-MIG e servir de base técnica e científica para o entendimento dos princípios básicos que envolvem o processo, e servirem de base para a discussão dos resultados.

Neste capítulo é apresentado um histórico do processo, suas características operacionais, princípios de funcionamento e aplicações industriais. Como o Plasma-MIG é um processo de soldagem híbrido, será também apresentado de forma simples e objetiva os princípios básicos dos processos que o originou, no caso, os processos Plasma e MIG/MAG.

2.1 Histórico

No ano de 1958, Yenni e Williamsville (1958) registraram uma das primeiras patentes em que eram associados um arco Plasma (denominado na patente como “High Pressure Arc Process” – Processo a Arco com Alta Pressão) e uma alimentação externa de arame energizado direcionada ao arco Plasma e projetada em direção à peça de trabalho (correspondente ao circuito MIG/MAG) (Figura 2.1). Com esta associação, os autores relataram que a transferência de metal ocorreu de forma estável e também foi possível promover um maior controle sobre a penetração, por meio da variação da intensidade de corrente no circuito Plasma. Esta foi provavelmente a primeira experiência com o que atualmente é chamado de processo Híbrido de soldagem.

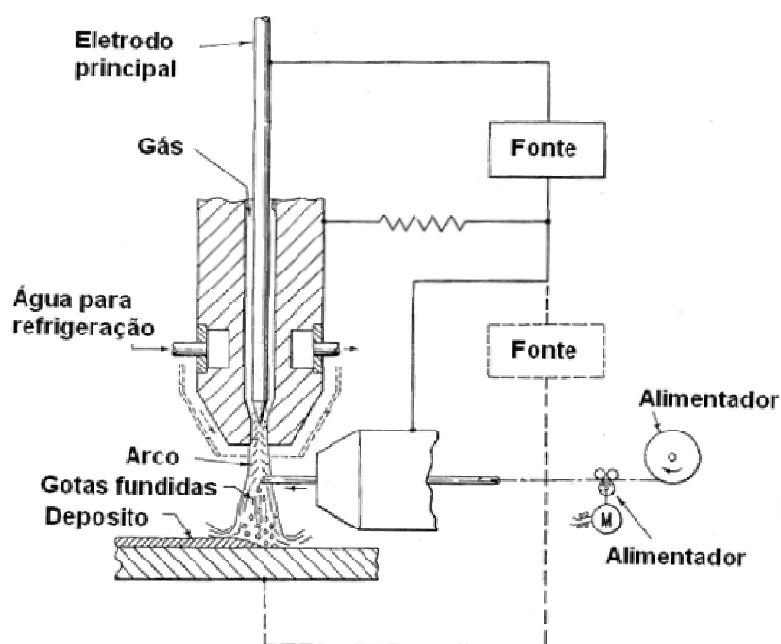


Figura 2.1 - Esquema de um equipamento para soldagem a arco com alta pressão
(Adaptado de: YENNI; WILLIAMSVILLE, 1958).

Um “Híbrido”, é definido por Ferreira (2004), como “o resultado da contribuição de duas ou mais espécies diferentes”. Ou seja, quando ocorre um “sinergismo”, como uma “ação cooperativa de duas ou mais substâncias, de modo que o efeito resultante é maior que a soma dos efeitos individuais destas. A partir destes conceitos e definições, um Processo Híbrido de Soldagem pode ser entendido como: Um processo resultante da combinação de no mínimo dois outros convencionais, e que seja capaz de oferecer vantagens que cada um seria incapaz de oferecer individualmente. Messler (2004) afirma que um híbrido torna-se interessante quando, a partir de dois processos distintos, é criado um maior que cada um deles individualmente.

O processo de soldagem Plasma-MIG propriamente dito foi desenvolvido no ano de 1969 no laboratório de pesquisas da Philips em Eindhoven na Holanda (ESSERS et al., 1971 *apud* HARRIS, 1994a). Nos primeiros modelos de tocha, o eletrodo Plasma era posicionado lateralmente em relação ao eletrodo MIG/MAG, como mostrado na Figura 2.2. Este modelo foi amplamente utilizado em pesquisas durante as décadas de 70 e 80, mas como citado por Oliveira (2006), a tecnologia de automatização/mecanização e de fontes então disponíveis foi, provavelmente, uma das dificuldades que impediram a maior utilização do Plasma-MIG na época.

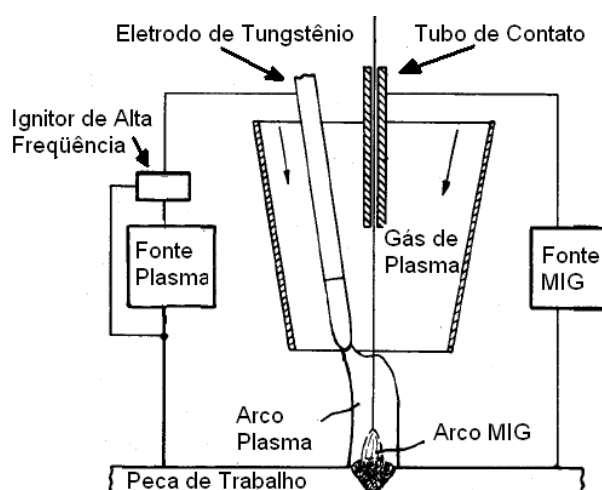


Figura 2.2 - Esquema de um equipamento para soldagem Plasma-MIG usada em pesquisas nas décadas de 70 e 80 (Adaptada de ESSERS, 1980).

Nos últimos anos, com a crescente demanda da indústria por processos de soldagem capazes de realizar operações cada vez mais especializadas e de alto rendimento e produtividade, o processo Plasma-MIG ressurgiu como uma atraente alternativa (CUNHA et al., 2006). Considerando uma espécie de linha do tempo de surgimento dos processos de soldagem, o processo Plasma-MIG aparece como um dos processos mais recentes (Figura 2.3 – adaptada e atualizada por Reis e Scotti (2007), a partir de Okumura e Taniguchi (1982)). Lembrar que, apesar de ser estudado desde a década de 70, somente agora o processo aparece como alternativa em potencial para a indústria.

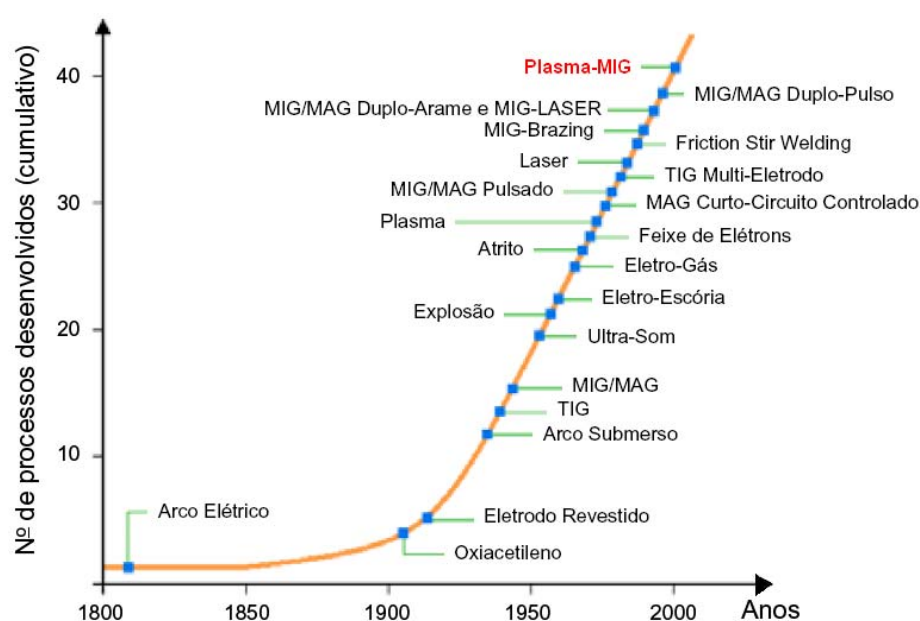


Figura 2.3 - Linha do Tempo do Surgimento dos Processos de Soldagem (REIS; SCOTTI, 2007).

Como o Plasma-MIG é um processo de soldagem híbrido, antes de apresentar suas características, serão apresentados primeiramente os processos que o deram origem, uma vez que muitos dos fenômenos que ocorrem em um processo de soldagem híbrido são devido às particularidades dos processos de origem, neste caso, os processos Plasma e MIG/MAG.

2.2 Processo de soldagem a Plasma (PAW)

O processo de soldagem a Plasma é um processo de soldagem a arco que promove a coalescência de metais pelo aquecimento gerado a partir de um arco constrito, que pode ser aberto entre um eletrodo não consumível e a poça de fusão (arco transferido) ou entre o eletrodo e o bocal de constrição (arco não-transferido) (AWS, 1991). Na Figura 2.4 são mostrados esquematicamente os detalhes característicos de uma tocha para soldagem a Plasma.

É um processo com arco concentrado e bastante estável, que favorece a penetração. Além disto, no modo com alimentação de arame, há uma pequena dependência entre seu arco e o material alimentado. Mas exige-se uma melhor preparação e posicionamento da junta, para garantir que o cordão esteja sobre o centro da mesma.

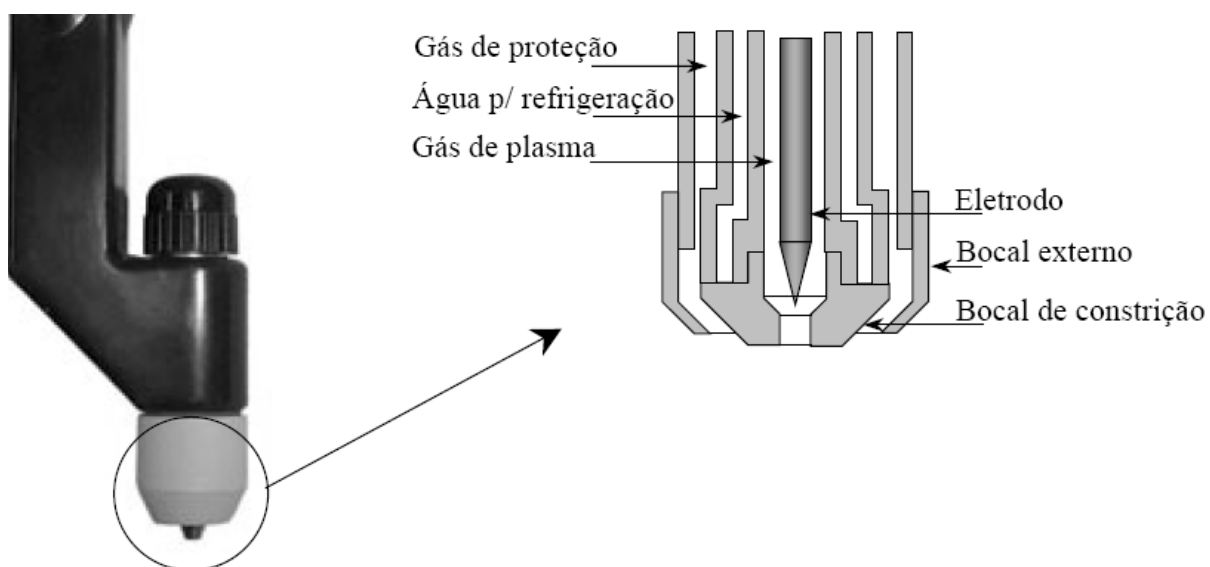


Figura 2.4 - Visão geral de uma tocha de soldagem a Plasma (RICHETTI, 2003).

A soldagem a arco Plasma tem sido normalmente classificada em três modos de operação: “microplasma” ou baixa corrente ($I \leq 20 \text{ A}$), “melt-in” ou média corrente

($20\text{ A} < I < 400\text{ A}$) e “keyhole” ou buraco de fechadura ($I > 100\text{ A}$) (AWS, 1991; HARRIS, 1994b).

O modo “microplasma” apresenta a vantagem de operar com correntes muito baixas, apresenta um arco bastante estável e é adequado para soldar chapas de pequenas espessuras. Devido à concentração do arco, as distorções das juntas são reduzidas e pode ser utilizado tanto de forma manual quanto mecanizada (AWS, 1991).

No modo “melt-in”, a poça de fusão é bastante similar a obtida pelo processo TIG (HARRIS, 1994b). Esse modo de operação do processo Plasma é normalmente preferido em relação ao processo TIG em operações de soldagem mecanizada devido ao controle mais eficiente da poça de fusão.

A soldagem com o modo “keyhole” é uma das aplicações mais importantes do processo a Plasma e a que recebeu mais atenção na literatura do que qualquer outra variante do processo (RICHETTI, 2003). Assim, o termo “keyhole” é utilizado para designar uma técnica não convencional de soldagem, na qual o arco atravessa completamente a peça que está sendo soldada, formando um pequeno orifício em forma de funil. A poça de fusão estende-se através de toda a espessura da junta e é mantida na posição pelas forças de tensão superficial do material fundido (AWS, 1991). Devido a ser o modo de operação mais importante para o processo Plasma, as considerações que seguem, são relativas ao modo “keyhole”.

O processo Plasma apresenta um maior número de variáveis de soldagem em relação a outros processos convencionais e normalmente o ajuste de uma condição operacional é feito considerando os parâmetros principais que são a corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de Plasma. Parâmetros considerados secundários, como o diâmetro do orifício constritor, o recuo do eletrodo e a distância entre a tocha e a peça, também podem afetar as características geométricas do cordão de solda e do arco de plasma (RICHETTI, 2003).

A corrente de soldagem é uma das principais variáveis dos processos de soldagem a arco e, particularmente na soldagem a Plasma, tem uma influência significativa sobre os efeitos elétricos e mecânicos do arco (RICHETTI, 2003). Segundo Pinfold e Jubb (1973), uma redução abaixo do nível ótimo causa uma perda da penetração e prejudica o aspecto superficial da solda. Um aumento na corrente aumenta a penetração e provoca o aplainamento ou depressão no topo da solda (Figura 2.5), correntes excessivas causam o colapso da poça de fusão devido ao aumento da pressão do arco sobre a mesma, quando este valor supera a força de tensão superficial, que mantém o metal fundido na poça.

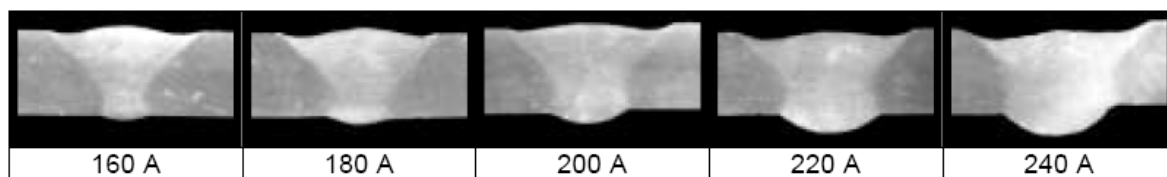


Figura 2.5 - Efeito da corrente de soldagem sobre o perfil de cordão (RICHETTI, 2003).

A velocidade de soldagem é também um dos parâmetros mais importantes na determinação da geometria do cordão de solda, pois influencia a taxa de calor transferido à peça por unidade de comprimento soldado (RICHETTI, 2003). Velocidades de soldagem muito altas causam problemas de mordedura e penetração incompleta, baixas velocidades resultam em concentração excessiva de calor e formação de poças largas (Figura 2.6), que podem chegar ao colapso (PINFOLD; JUBB, 1973).

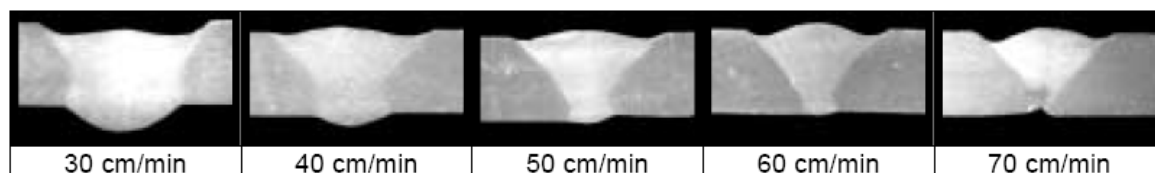


Figura 2.6 - Efeito da velocidade de soldagem sobre o perfil de cordão, (RICHETTI, 2003).

A Vazão de Gás de Plasma é o principal responsável pelos efeitos mecânicos que atuam sobre a poça de fusão. Um decréscimo na vazão diminui o poder de penetração do Plasma e prejudica o acabamento superficial da solda, um acréscimo na vazão aumenta a penetração e achata o topo do cordão (PINFOLD; JUBB, 1973). Richetti (2003) verificou também que o aumento da vazão do gás de plasma promove um aumento no volume de material fundido, assim como força um maior afundamento do cordão na junta (Figura 2.7).

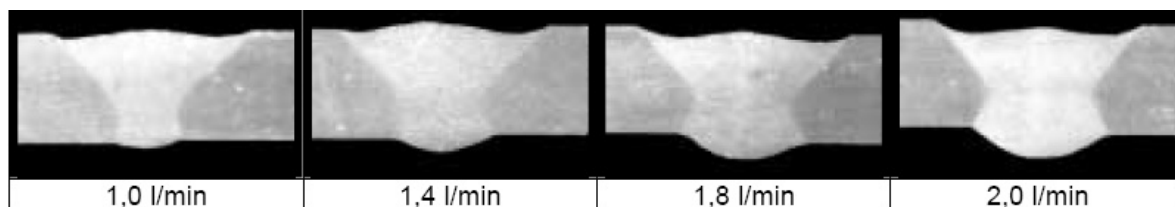


Figura 2.7 - Efeito da vazão do gás de Plasma sobre o perfil da solda ($I = 190 \text{ A}$), (RICHETTI, 2003).

O Diâmetro do Orifício Constritor é o responsável pelo efeito de constrição física do arco e conseqüentemente exerce influência direta na pressão exercida pelo mesmo sobre o metal fundido. Segundo Pinfold e Jubb (1974), um aumento do diâmetro do orifício diminui a

densidade de corrente e reduz o poder de penetração do Plasma. Portanto, o diâmetro deve ser o menor possível (principalmente para o modo “Keyhole”) para concentrar o arco, porém, menor é a corrente admissível de soldagem para que não ocorra a formação do arco duplo. O fenômeno do *arco duplo* ocorre quando o caminho preferencial da corrente elétrica deixa de ser a coluna do arco entre o eletrodo e a peça. Nesta situação, a tocha metálica forma parte do caminho da corrente. Em essência, dois arcos são formados, um entre o eletrodo e o bocal e um entre o bocal e a peça (AWS, 1991).

O Recuo do Eletrodo determina a distância em que o mesmo é recuado em relação à face externa do bocal de constrição. O seu ajuste atua sobre o grau de constrição do arco, influenciando sua rigidez e a penetração da solda (RICHETTI, 2003). Recuos maiores levam a formação de cordões estreitos e mais profundos e são utilizados para o plasma operando no modo “Keyhole”. Por outro lado, recuos menores levam a formação de cordões largos e menos profundos e são utilizados para o plasma operando no modo “melt-in”.

A Distância Tocha Peça, como citado na AWS (1991), não afeta de forma significativa o perfil do cordão de solda obtido, devido essencialmente ao formato cilíndrico do arco, que mantém praticamente constante sua área de contato com a chapa quando a distância tocha peça varia. Em suas investigações, Richetti (2003), também não observou nenhuma alteração aparente no cordão de solda, confirmando a tolerância do processo em relação à distância tocha peça, quando variada dentro dos limites normais de trabalho (de 3 até cerca de 6 mm).

O processo PAW é geralmente aplicado quando a alta penetração da soldagem pode ser explorada para minimizar o número de passes e, conseqüentemente, o tempo de soldagem. É comumente usado na soldagem de aços inoxidáveis em uma larga faixa de espessura, pode também ser utilizado com aços carbono e aços ligas, ligas de alumínio, ligas de titânio, ligas de cobre e níquel (HARRIS, 1994b).

2.3 Processo de soldagem MIG/MAG

2.3.1 Introdução

O processo de soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas - também conhecido como GMAW (Gas Metal Arc Welding)) é um processo de soldagem a arco que usa um arco entre um arame-eletrodo de alimentação contínua e uma poça de fusão. O processo incorpora a alimentação automática de um eletrodo consumível contínuo que é protegido por um suprimento externo de gás (AWS, 1991). A maneira com que o metal se transfere do eletrodo consumível para a peça de trabalho tem influência significativa sobre a

estabilidade do processo e características físicas e químicas da solda obtida. Na Figura 2.8 é apresentada uma vista esquemática de um bocal da tocha, arame eletrodo e arco MIG/MAG mais metal de base e metal depositado.

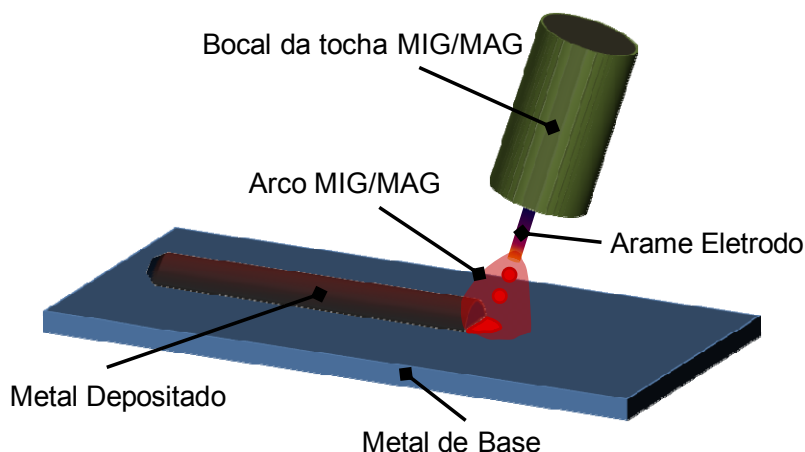


Figura 2.8 – Vista esquemática de um bocal da tocha, arame eletrodo e arco MIG/MAG mais metal de base e metal depositado.

2.3.2 Modos de transferência metálica

A maneira com que o material é transferido da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão tem grande influência sobre o desempenho do processo MIG/MAG: afeta a estabilidade do processo, a geração de respingos, a qualidade da solda e a capacidade posicional do processo (NORRISH, 1992).

Diferentes modos de transferência metálica podem ser observados no processo MIG/MAG e estão associados a fatores tais como, os parâmetros elétricos (tensão, corrente e polaridade), materiais, gases, distância de bico de contato peça (DBCP), características da fonte, etc (VILARINHO, 2007). Esses modos de transferência podem ser classificados dentro de dois grupos principais: transferência em voo livre e transferência por curto-circuito. Na transferência por voo livre, um arco é mantido entre a ponta do eletrodo e a peça e o metal é transferido através do arco na forma de gotas. O tamanho das gotas e a frequência de transferência podem variar e diversas subdivisões são necessárias para acomodar essas variações (NORRISH, 1992), essas subdivisões serão apresentadas a seguir de acordo com classificação recente do IIW (International Institute of Welding).

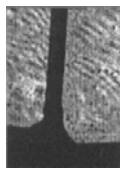
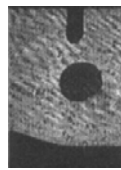
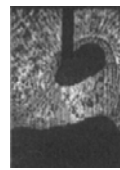
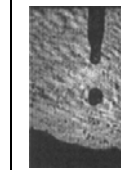
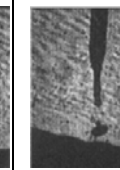
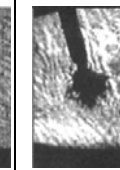
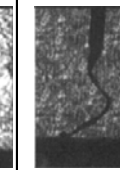
Como apresentado por Lucas et al. (2005), recentemente o IIW vem propondo atualizações e revisões na classificação dos modos de transferência metálica englobando as novas variantes dos mecanismos obtidos com os avanços na tecnologia de fontes e de sistemas de controle. Como resultado, foi proposto um conceito básico denominado *Modos Fundamentais de Transferência Metálica*, ou seja, é o conjunto de modos de transferência

que são bem definidos e podem ser claramente distinguidos uns dos outros. Estes modos podem ser *Naturais* ou *Controlados*. No modo *Natural*, a transferência metálica varia naturalmente dentro de uma faixa de corrente e níveis de tensão. No modo *Controlado*, controladores são usados nas fontes de soldagem para fornecer formatos de onda de corrente, de tal forma que a transferência ocorra de forma controlada.

A Tabela 2.1 ilustra a proposição desta classificação, obedecendo a uma ordem lógica de aumento da corrente, à medida que se caminha dos modos A para E (VILARINHO, 2007).

Tabela 2.1 – Recente Proposta de Classificação para os modos de transferência Metálica.

Adaptado de Vilarinho (2007).

Proposta de Classificação Pelo IIW	Fundamental		A		B		C	D		E
	Curto - Circuito		Globular		Pulsada Projetada		Goticular (Spray)		Rota-cional	
	An	Ac	B1	B2			D1	D2		
Tipo Fundamental	Variante		Curto- Circuito Controlado		Globular em Gotas		Globular repelida		Pulsada	
	Natural		Controlado		Natural		Natural		Controlado	
Visualização	Natural		Controlado		Natural		Natural		Controlado	
										
	Goticular		Elongamento (streaming)		Explosiva		Rotacional			
										

Na Transferência por Curto-Circuito, o crescimento da gota ocorre com correntes baixas a moderadas e baixas tensões no arco, o que leva a um arco curto. Desta forma, o metal fundido é transferido por contato diretamente à poça de fusão, principalmente por ação da tensão superficial e das forças eletromagnéticas. É a forma de transferência mais usada na soldagem de peças de pequenas espessuras, e na soldagem fora da posição

plana, devido ao menor aporte térmico envolvido em comparação a outros modos de transferência.

A Transferência Globular é típica da soldagem com correntes baixas a moderadas, porém com tensões mais elevadas. O metal de adição se destaca do eletrodo e é transferido para a poça de fusão basicamente por ação gravitacional. Com esta forma de transferência, um elevado nível de respingos e instabilidades do arco é comum e a operação está restrita à posição plana.

A transferência Goticular (*Spray*) é típica de altas tensões e correntes de soldagem (acima da corrente de transição globular – goticular, que será apresentada em seguida), o metal se transfere como na forma de pequenas gotas com diâmetro aproximadamente igual ao do eletrodo, sob a ação de intensas forças eletromagnéticas. É um modo de transferência estável, livre de respingos e de alta produção. No entanto, devido às altas correntes, as soldagens fora da posição plana e de chapas finas tornam-se praticamente impossíveis.

A corrente de *transição globular - goticular* é uma estreita faixa de corrente onde ocorrem mudanças no modo de formação da gota, passando de grandes gotas em baixa frequência a pequenas gotas em alta frequência. O valor da corrente de transição é função do material, diâmetro e comprimento do eletrodo, assim como gás de proteção e DBCP. Na Figura 2.9, Keocheguerians; Resende; Vilarinho (2007) ilustram a mudança do modo de transferência, passando pela transição globular – goticular, em função da variação no valor da corrente.

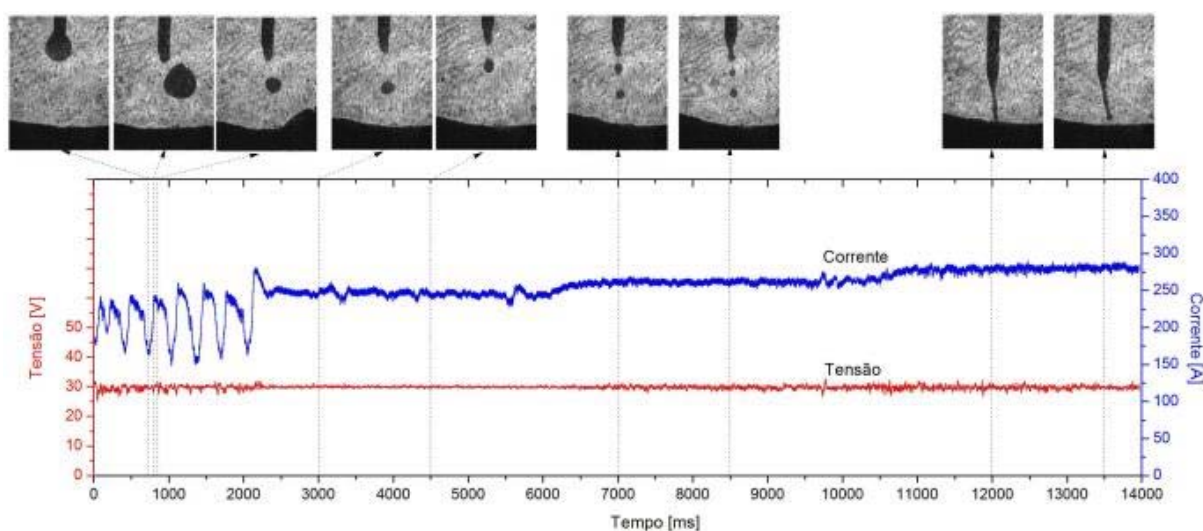


Figura 2.9 – Modos de transferência em função da corrente para eletrodo ER70S-6, 1,2 mm, DBCP de 18 mm e Ar+CO₂ (KEOCHEGUERIAN; RESENDE; VILARINHO, 2007).

Um aumento ainda maior da corrente e a manutenção do comprimento do arco na transferência goticular implicam na formação de um cone na ponta do eletrodo e gotas com diâmetros menores que o diâmetro do eletrodo, o que caracteriza a transferência com Elongamento (streaming).

A transferência Explosiva é caracterizada por gotas que explodem antes do destacamento, podendo ser observada em soldagem MIG/MAG de alumínio com eletrodo contendo magnésio (por exemplo: ER5356), causando fumos e respingos.

A transferência Rotacional é típica de altas tensões e corrente, agora acima da transição goticular – rotacional, onde a ponta do eletrodo serve como um pivô para que o filamento líquido em transferência execute um movimento rotacional-espiral e/ou em forma de cone. As gotas possuem um diâmetro muito menor que o eletrodo, com elevada frequência e a transferência é considerada instável.

A transferência Pulsada é conseguida com fontes especiais que impõem uma forma especial à onda de corrente de soldagem, caracterizada por pulsos periódicos de alta corrente (acima da corrente de transição). Esta pulsação permite uma transferência goticular com valores médios de corrente inferiores aos valores nos quais esta forma de transferência naturalmente ocorre. Assim, obtêm-se as vantagens desta transferência com baixos valores de corrente, permitindo a soldagem fora da posição plana e de juntas de pequena espessura. As maiores limitações desta forma de operação são a sua maior complexidade de operação e a necessidade de equipamentos especiais.

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA-MIG

2.4.1 Introdução

O Processo de Soldagem Plasma-MIG, como citado no início do capítulo, pode ser definido como a combinação dos processos a Plasma e MIG/MAG em uma única tocha, onde o metal de adição é alimentado pelo orifício do bocal Plasma. O processo pode ser usado tanto para soldagem de união, quanto de revestimento (HARRIS, 1994a). Ele une as vantagens de alta produtividade dos processos de soldagem a arco aos menores custos dos equipamentos, proporcionados pelas possibilidades de combinação entre as fontes de corrente comercialmente disponíveis para a soldagem a Plasma e MIG/MAG (MATTLES; KOHLER, 2002), necessitando apenas de um cabeçote especial, capaz de fazer o recuo do eletrodo (necessário para o funcionamento do procedimento de abertura do arco “Soft Start”, que será apresentado posteriormente) e de um sistema para comandar as duas fontes de soldagem.

No processo MIG/MAG e nos outros processos baseados em eletrodos consumíveis, a corrente de soldagem, a taxa de alimentação de metal de adição e o comprimento do eletrodo estão estreitamente interligados. Este fato traduz a forte dependência existente entre o aporte de energia e o aporte de material dos processos que trabalham com eletrodos consumíveis. Para Oliveira (2006), uma das principais conseqüências desta dependência é a dificuldade em se atuar na geometria do cordão de solda. Por outro lado, Harris (1994a) aponta que para o processo Plasma-MIG o controle independente do arco Plasma e da corrente que flui através do arame, permite um melhor controle sobre o metal depositado, melhorando a produtividade, e dando maior flexibilidade no controle do calor que é transferido à peça.

2.4.2 Princípios de operação

A característica fundamental do processo Plasma-MIG é que o arame eletrodo e seu respectivo arco (parte MIG/MAG do processo) são envolvidos por um gás termicamente ionizado (parte Plasma do processo), formando um arco híbrido. Isto é bastante diferente do processo MIG/MAG convencional, no qual o gás a temperatura ambiente é alimentado ao redor do arame e do arco.

Na sua concepção original, o eletrodo de tungstênio responsável pela geração do arco Plasma, era localizado ao lado do bico de contato MIG/MAG, como ilustrado no esquema da Figura 2.2. Nesta configuração, o bocal da tocha, posicionado entre o eletrodo não consumível e a peça, era o responsável por estabilizar a coluna de Plasma, e qualquer distúrbio no processo podia desestabilizá-la (ESSERS et al., 1981).

Foi, então, proposto por Essers et al. (1981), um novo projeto de tocha, no qual o eletrodo pontiagudo de tungstênio foi substituído por um eletrodo anular de cobre com insertos de carbono (Figura 2.10). Esta configuração conferiu uma maior rigidez à coluna de Plasma e continua sendo utilizada atualmente, sendo que os insertos de carbono foram substituídos por tungstênio, ou simplesmente suprimidos.

Ainda de acordo com Essers et al. (1981), com este tipo de eletrodo, o gás de Plasma não precisa ser totalmente inerte e pode usar a polaridade positiva em ambos os circuitos (Plasma e MIG/MAG), que garante maior estabilidade na porção MIG/MAG do processo. Naturalmente o bocal constritor de Plasma passa a ter um orifício maior do que o utilizado para o processo convencional, para permitir a passagem, também de forma concêntrica, do arame. A alta taxa de aquecimento da tocha, provocada pelos dois fluxos de corrente deve agora ser compensada por um eficiente sistema de refrigeração.

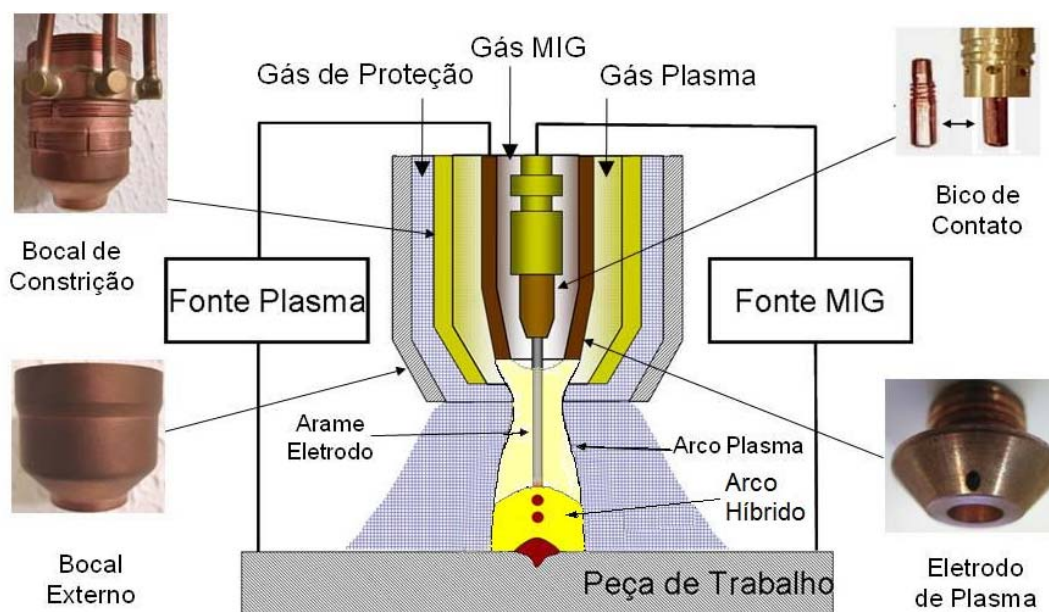


Figura 2.10– Desenho esquemático de uma tocha para soldagem Plasma-MIG, com destaque para os componentes principais (Adaptado de OLIVEIRA; DUTRA, 2007).

2.4.3 Tipos de Plasma-MIG quanto ao formato e posicionamento do eletrodo plasma

Por se tratar de uma tecnologia relativamente nova, ainda existem divergências quanto à nomenclatura para o processo e a principal está relacionada à designação da tocha (existem tanto tochas similares com nomes diferentes, quanto tochas diferentes com nomes iguais). Portanto, é importante observar estas diferenças para evitar comparações equivocadas. Para tanto, segue uma distinção entre as variantes do processo.

→ Tocha Plasma-MIG com eletrodo pontiagudo de tungstênio

Corresponde ao primeiro modelo desenvolvido por Essers (1980) (Figura 2.2), onde o eletrodo utilizado era de tungstênio em formato pontiagudo e posicionado lateralmente ao eletrodo MIG/MAG, que por sua vez era alimentado concentricamente em relação ao bocal constritor Plasma. No entanto, não foi encontrado na literatura trabalhos desenvolvidos nos últimos 10 anos com este modelo.

→ Tocha Plasma-MIG associando os processos Plasma e MIG/MAG.

Corresponde ao terceiro modelo de tocha encontrado na literatura, que neste caso está relacionada ao instituto comercial de pesquisas PLT (Plasma Laser Technologies) que desenvolve o processo a nível comercial (Figura 2.11). A particularidade encontrada, é que nos relatórios técnicos (disponíveis para download em: www.weldingsolutionsinc.com e www.plasma-laser.com. Último acesso em: 29/10/2008), o processo é descrito como um processo de soldagem híbrido Plasma-MIG, apresentado comercialmente com o nome

Super-MIG[®], e apresenta características construtivas distintas das encontradas nas demais literaturas técnicas.

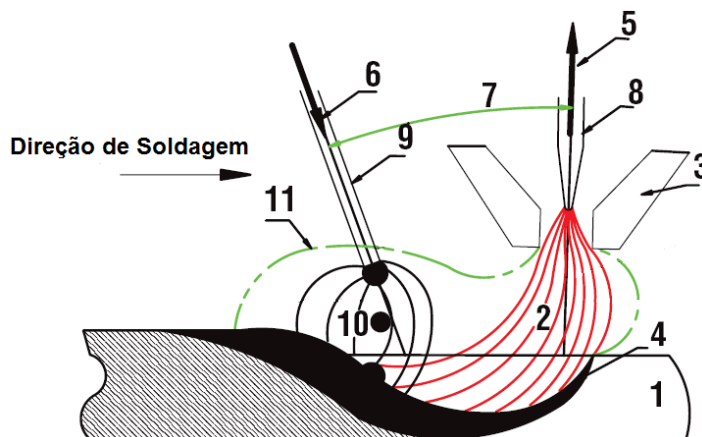


Figura 2.11 - Combinação dos Processos Plasma e MIG/MAG em um único processo. 1 - Peça de Trabalho; 2 - Jato de Plasma; 3 - Bocal Plasma; 4 - Poça de fusão; 5 - Sentido da corrente Plasma; 6 - Sentido da corrente MIG/MAG; 7 - Ângulo entre os eletrodos; 8 - Eletrodo de tungstênio; 9 - Eletrodo MIG/MAG; 10 - Arco MIG/MAG; 11 - Plasma. Adaptado de Dykhno e Davis (2006).

O eletrodo MIG/MAG não é alimentado concentricamente ao bocal de constrição, tampouco ao eletrodo Plasma, mas sim atrás do eletrodo Plasma, além do que, o arco Plasma não mais envolve o eletrodo consumível, como nos casos anteriores. Neste caso, apenas o bocal externo é responsável por envolver e integrar as duas partes do processo, o que, de acordo com Dykhno e Davis (2006), é suficiente para caracterizá-lo como híbrido. No entanto, o arco formado entre a ponta do eletrodo consumível e a peça não tem as características de um arco híbrido, assim como definido por Oliveira e Dutra (2007).

→ Tocha Plasma-MIG com eletrodos concêntricos

Corresponde ao segundo modelo desenvolvido por Essers et al. (1981), onde o eletrodo consumível é alimentado concentricamente ao eletrodo Plasma (Figura 2.10), é atualmente fabricado e comercializado pela empresa TBi, e tem sido utilizada na maioria das pesquisas publicadas na última década, como por exemplo Chigarev et al. (2001), Makarenko; Granovsky; Kondrashov (2001), Oliveira e Dutra (2007), Tanaka et al. (2008), dentre outros.

Verificando as informações presentes na literatura, em especial, a japonesa, também pode ser encontrada a denominação *i-GMA* (*ionized* - Gás Metal Arc Process) para o processo Plasma-MIG, que de acordo com a descrição de Tanaka et al. (2008), corresponde

ao processo de soldagem MIG/MAG com um suprimento adicional de gás ionizado (Plasma) ao redor do arco MIG/MAG, que corresponde justamente ao processo Plasma-MIG com eletrodos concêntricos.

2.4.4 Acendimento do arco Plasma

No processo de soldagem Plasma-MIG, a abertura do arco pode ser conseguida basicamente de três maneiras: alta frequência; curto-circuito do eletrodo MIG/MAG e “Soft Start”.

A primeira maneira, como descrito por Essers et al. (1981), foi utilizado na versão original do processo. O equipamento para o processo de soldagem Plasma-MIG iniciava o arco com o auxílio de uma descarga elétrica de alta frequência. No entanto, essa forma de ignição possui alguns inconvenientes, como:

- A tocha tem que ser construída de tal maneira que a descarga de alta frequência não atinja partes vitais da tocha;
- O sinal de alta frequência pode prejudicar o funcionamento de computadores, e sinais de controle podem ser influenciados.

A segunda maneira, também citada por Essers et al. (1981), é a abertura por curto-circuito. Nesse modo de abertura, uma apreciável quantidade de respingos é gerada (Figura 2.12), e se o processo é iniciado da mesma maneira que o MIG/MAG convencional, os respingos podem alcançar partes vitais da tocha, danificando a mesma. Por causa do calor da coluna de Plasma, qualquer respingo em contato com o eletrodo Plasma pode-se fundir com o cobre do eletrodo. Se isto acontecer, podem ocorrer efeitos adversos na estabilidade da coluna de Plasma e nos mecanismos de limpeza da peça.

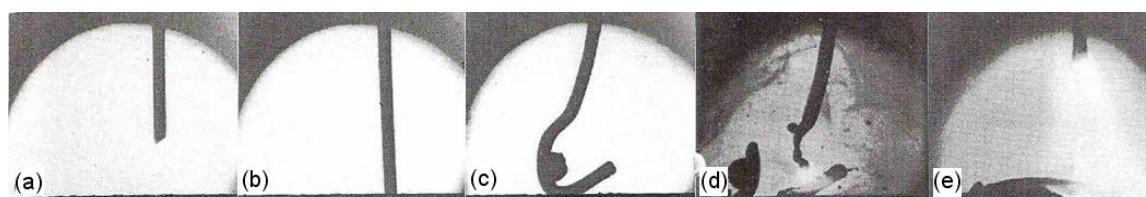


Figura 2.12 - Fotografias de alta velocidade do acendimento do arco no processo Plasma-MIG por Curto-Circuito. (a) arame movendo-se em direção a peça; (b) Curto-Circuito; (c) Arame-se dobrando e inicio da fusão; (d) Acendimento do arco MIG/MAG; (e) Acendimento do arco Plasma. Essers et al. (1981).

Tendo em vista as dificuldades apresentadas anteriormente, no início da década de 80 foi proposto por Essers et al. (1981) um novo método de acendimento do arco, chamado “Soft Start”, conforme esquema da Figura 2.13. Nesta forma de acendimento do arco, o

arame-eletrodo é utilizado para gerar um arco de baixa intensidade, através do qual ocorre a formação do arco Plasma. Tal procedimento foi detalhado por Oliveira (2006) e ocorre basicamente em seis etapas, a saber:

Etapa 1: A fonte Plasma apresenta tensão em vazio, e a fonte MIG/MAG apresenta uma tensão de referência ($\approx 6V$) que é responsável por identificar o momento em que o arame eletrodo toca a peça.

Etapa 2: Ao toque do arame na peça, o movimento do mesmo é interrompido e a fonte gera um arco de baixa intensidade de corrente (em torno de 30 A), sem fusão considerável do arame.

Etapa 3: O alimentador de arame inverte a rotação e o arame retrocede em direção à tocha de soldagem, trazendo progressivamente o seu arco para dentro da tocha, até que o mesmo aproxime do eletrodo do Plasma.

Etapa 4: Como a fonte Plasma já possui tensão em vazio, ocorre o acendimento imediato do arco-plasma, devido à atmosfera ionizada pelo arco MIG/MAG de baixa potência. Neste momento o movimento de recuo do eletrodo é interrompido.

Etapa 5: Após o acendimento do arco Plasma, o arco MIG/MAG é extinto (corte de energia) com o objetivo de impedir a transferência metálica e de proporcionar um pré-aquecimento no início da junta somente com a energia do arco Plasma.

Etapa 6: O arame volta a se deslocar em direção à peça de trabalho e, como a fonte MIG/MAG apresenta novamente tensão em vazio e o meio está ionizado pelo arco Plasma, ocorre o re-acendimento espontâneo do arco MIG/MAG, sem necessidade de curto-circuito (isso garante um início de cordão de solda livre de respingos), mas já com a corrente regulada para a operação de soldagem.

Para facilitar a visualização do procedimento “Soft Start”, é apresentado na Figura 2.14 uma seqüência de imagens obtidas com câmera de alta velocidade, onde é possível observar, na parte superior preferencialmente o arco e na parte inferior preferencialmente o arame. Cada imagem apresentada corresponde, na seqüência, a uma etapa do processo de abertura do arco, também estão identificados os tempos de cada etapa em milissegundos.

Em seus trabalhos, Oliveira (2006) obteve ótimos resultados com o sistema “Start Soft” na soldagem do alumínio, proporcionando uma abertura sem instabilidades ou respingos. Entretanto, na soldagem com aço carbono observou que imediatamente após o curto circuito pode ocorrer de o arame aderir à peça, devido a um pequeno faiscamento no momento do contato, que provoca fusão na ponta do arame e, conseqüente, aderência na superfície da peça, impedindo o retorno do mesmo em direção ao bico de contato, o que causa a extinção do arco de baixa potência.

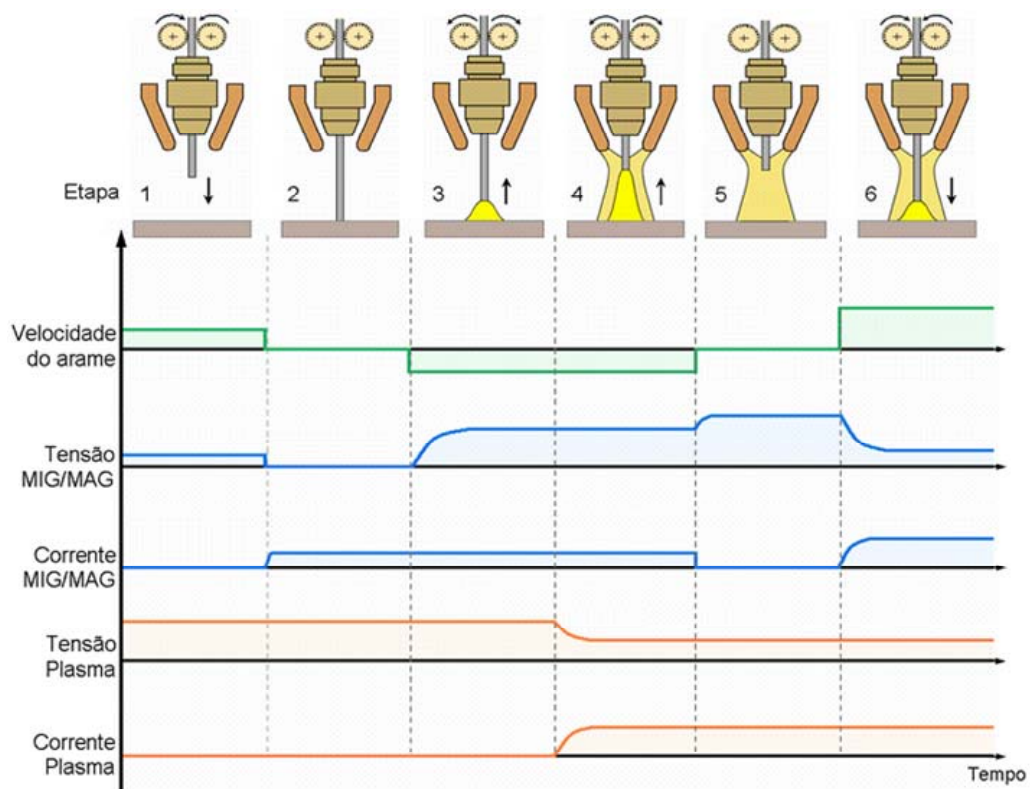


Figura 2.13 - Esquema de funcionamento do “Soft Start” (Adaptado de: REIS; SCOTTI, 2007; OLIVEIRA, 2006; SLV, 2008)

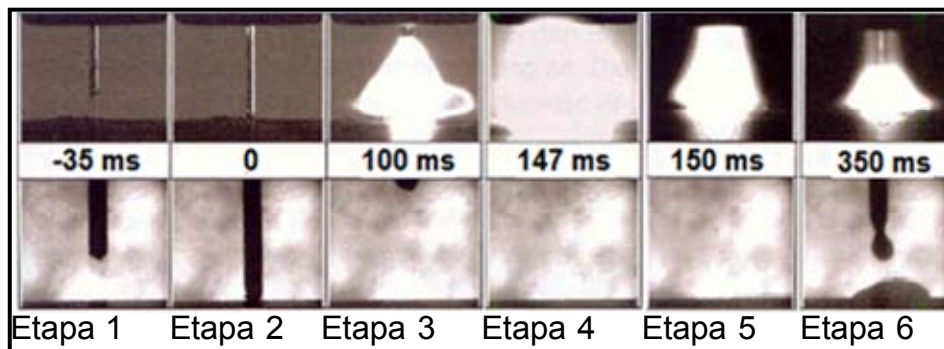


Figura 2.14 - Sequência de fotos do acendimento do arco plasma com identificação das etapas relativas ao “Soft Start” (Adaptado de OLIVEIRA, 2006).

2.4.5 Gases para o processo Plasma-MIG

Como o processo exige o fornecimento de três gases (Gás MIG/MAG, Gás de Plasma e Gás de Proteção Externo), várias combinações e formas de suprimento entre os mesmos podem ser obtidas. Essers et al. (1981) apresenta quatro combinações operacionais, a saber, que incluem alimentação combinada ou separada de gases:

1. Gás MIG/MAG, Gás de Plasma e Gás de Proteção Externo são alimentados separadamente. Esta é assumida como a melhor solução, uma vez que se pode controlar a

quantidade de cada gás e ajustar o processo quando necessário. O fluxo do Gás de Plasma em particular, é o mais crítico. Se o fluxo dos gases não é adequadamente regulado em cada caso, o arco Plasma pode se tornar instável e o aspecto da solda que pode adquirir uma aparência irregular;

2. Mistura dos três gases. O suprimento é realizado como uma simples mistura dos mesmos. No caso de utilizar misturas de CO_2 , a estabilidade do arco Plasma é satisfatória somente quando a quantidade de CO_2 é muito pequena, já que o cobre do eletrodo de Plasma pode ser atacado pelo oxigênio dissociado do CO_2 , provocando oxidação, e conseqüente, deterioração do mesmo;

3. Combinação entre os Gases de Plasma e de Proteção Externo. Isto é, alimentar o gás MIG/MAG separadamente e usar uma única mistura para a combinação Gás Plasma e de Proteção. Esta forma apresenta resultados satisfatórios na soldagem de alumínio. Já para a soldagem e revestimento de aço ao carbono e aço inoxidável que utilizem CO_2 no Gás Plasma e de Proteção, o mesmo entra em contato com o cobre do eletrodo Plasma e pode acelerar o seu processo de deterioração;

4. A última possibilidade é combinar os gases Plasma e MIG/MAG. O CO_2 necessário é alimentado pelo gás de proteção externo e não entra em contato com o eletrodo Plasma. Neste caso, os gases Plasma e MIG/MAG são alimentados proporcionalmente à corrente e tensão do Plasma e a corrente através do arame MIG/MAG. Agora, o gás de proteção pode ser escolhido livremente de acordo com o material a soldar, sem o risco de danificar o cobre do eletrodo Plasma.

2.4.6 Transferência de calor e geometria do cordão no processo Plasma-MIG

Para entender os mecanismos com que a energia térmica é transferida à peça e os mecanismos que governam a penetração no processo Plasma-MIG, Essers e Walter (1981) utilizaram a técnica de calorimetria por fluxo de água e observaram que existem diferenças entre as energias absorvidas pela peça para os processos MIG/MAG e Plasma-MIG. Nesta investigação, os autores utilizaram uma corrente de 150 A no circuito Plasma e variaram a corrente no circuito MIG/MAG. A porcentagem de energia térmica transferida à peça em função da energia total fornecida pelas fontes de soldagem foi de 65% para o processo Plasma-MIG e 71% para o processo MIG/MAG. Uma comparação gráfica é apresentada na Figura 2.15, entre as energias térmicas transferidas para a peça pelos processos Plasma-MIG e MIG/MAG, por exemplo, para uma corrente total de 300 A. O processo Plasma-MIG transfere a peça uma energia de aproximadamente 5,5 kW, enquanto que o MIG/MAG transfere aproximadamente 7,2 kW.

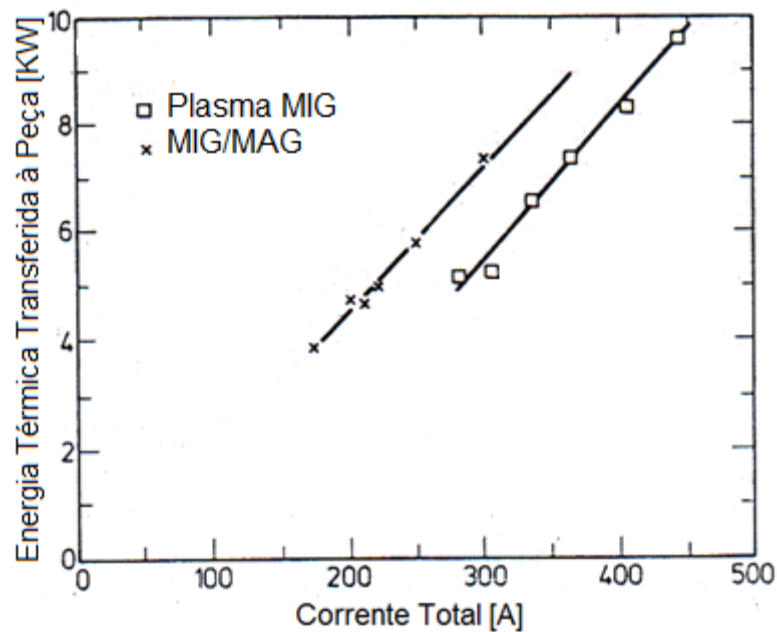


Figura 2.15 - Energia térmica transferida à peça em função da corrente total fornecida ao processo. (Adaptado de: ESSERS; WALTER, 1981).

As diferenças foram explicadas por existirem dois ânodos no processo Plasma-MIG, sendo um a extremidade do eletrodo do MIG/MAG e outra do eletrodo Plasma, que neste caso, parte do calor gerado no eletrodo Plasma é absorvida pelo sistema de refrigeração. Fato que leva a variação no perfil do cordão de solda quando comparados.

Jelmorini et al. (1975) avaliaram o perfil do cordão de solda para o processo Plasma-MIG, e mostraram que o aumento da corrente no circuito Plasma modifica o perfil do mesmo no sentido de aumentar a largura e promover uma melhor molhabilidade (Figura 2.16).



Figura 2.16 – Soldas com arame de aço inoxidável de 1,2 mm de diâmetro. Velocidades de soldagem a alimentação constantes. Da esquerda para a direita: 155 A e 0 A, 133 A e 30 A, 133A e 100 A de correntes MIG/MAG e Plasma respectivamente (JELMORINI et al., 1975).

Oliveira (2006), também avaliou a influência do balanço das correntes Plasma e MIG/MAG sobre a geometria do cordão de solda, e observou que quanto maior a corrente no circuito Plasma, maior a largura do cordão, mantendo-se a taxa de fusão do arame e a velocidade de soldagem constantes. Também observou uma leve mudança na geometria na zona fundida do metal de base, onde foi observada uma leve redução da penetração com a redução da corrente MIG/MAG (Figura 2.17).

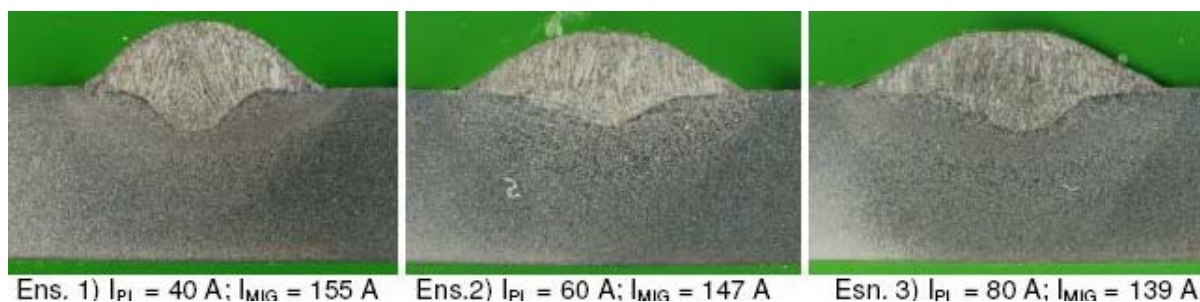


Figura 2.17 - Influência do balanço de correntes sobre a geometria do cordão de solda.

$V_{sold} = 0,3 \text{ m/min}$ e $V_{lim} = 5,3 \text{ m/min}$ para os três ensaios. Oliveira (2006).

2.4.7 Transferência metálica no processo Plasma-MIG

Essers; Jelmorini; Tichelaar (1972) avaliaram o perfil do arco e o modo com que o metal é transferido da ponta do eletrodo consumível a peça para o processo Plasma-MIG e observaram que quando as duas fontes estão conectadas aos eletrodos são formados dois arcos, um entre o eletrodo não consumível e a peça e um entre a ponta do arame eletrodo e a peça. Estes apresentam características distintas quanto conectadas em polaridades positiva ou negativa.

Para os dois eletrodos conectados em polaridade negativa, o arco formado entre o eletrodo consumível e a peça apresenta um perfil do tipo cônico e ocorre o efeito de “subida” do arco no eletrodo. A taxa de fusão do arame é aumentada e o tipo de transferência pode ser caracterizado como goticular axial, principalmente para altos valores de corrente, as gotas são pequenas. Na soldagem MIG/MAG convencional com argônio puro, normalmente as gotas formadas são maiores. Uma fotografia deste tipo de transferência, para o processo Plasma-MIG, é mostrada na Figura 2.18 (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).

Para os dois eletrodos conectados em polaridade positiva, dois modos de comportamento do eletrodo e de transferência metálica são observados, dependendo da corrente através do arame. Se a corrente é relativamente baixa, o arco apresenta um perfil estreito e cilíndrico (Figura 2.19) e o contato ocorre na ponta do arame. A transferência metálica ocorre de forma regular e sem respingos.

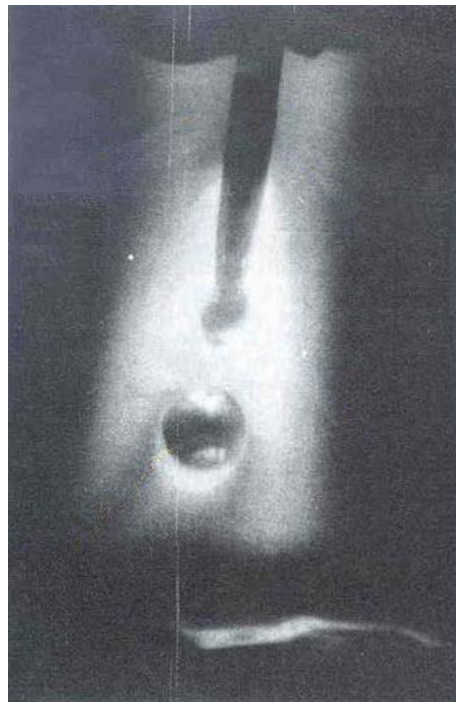


Figura 2.18 – Fotografia de soldagem Plasma-MIG com eletrodos na polaridade negativa. Corrente Plasma de 240 A à 40V e corrente MIG/MAG de 155A a 30V. Arame de aço inoxidável de 0,8 mm. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).



Figura 2.19 - Fotografia de soldagem Plasma-MIG com eletrodos na polaridade positiva. Corrente Plasma de 110 A à 49V e corrente MIG/MAG de 150A à 29V. Arame de aço inoxidável de 1,2 mm. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).

Se a corrente através do arame é aumentada, a transição Goticular-Rotacional é atingida e, acima dela, uma parte com comprimento livre do eletrodo se torna fluida e começa a rotacionar. Essers; Jelmorini; Tichelaar (1972) apresentam uma fotografia de transferência rotacional para o processo Plasma-MIG (Figura 2.20-a), similar a que é apresentada por Vilarinho (2007) referente ao processo MIG/MAG (Tabela 2.1). Mas de acordo com Essers; Jelmorini; Tichelaar (1972), o arco Plasma é capaz de promover uma transferência do tipo rotacional com uma quantidade reduzida de respingos, fazendo com que a faixa de utilização desse tipo de transferência no processo Plasma-MIG seja mais ampla se comparada à obtida com o processo MIG/MAG convencional, como pode ser observado pelos gráficos das Figura 2.21 e Figura 2.22.

Como no modo de transferência rotacional as gotas são transferidas a peça de forma não concentrada, a densidade de energia se torna menor, resultando em cordões com pouca penetração, como os mostrados na Figura 2.20-b. A Figura 2.23 mostra a taxa de deposição conseguida para os processos MIG/MAG e Plasma-MIG operando no modo de transferência rotacional com um nível aceitável de respingos em função da corrente de soldagem. Esses resultados, de alta taxa de fusão e baixa penetração, indicam que o processo tem também um grande potencial para aplicações de revestimentos. Também é importante observar que o processo Plasma-MIG opera com maiores comprimentos de eletrodo energizado, se comparado ao processo MIG/MAG.

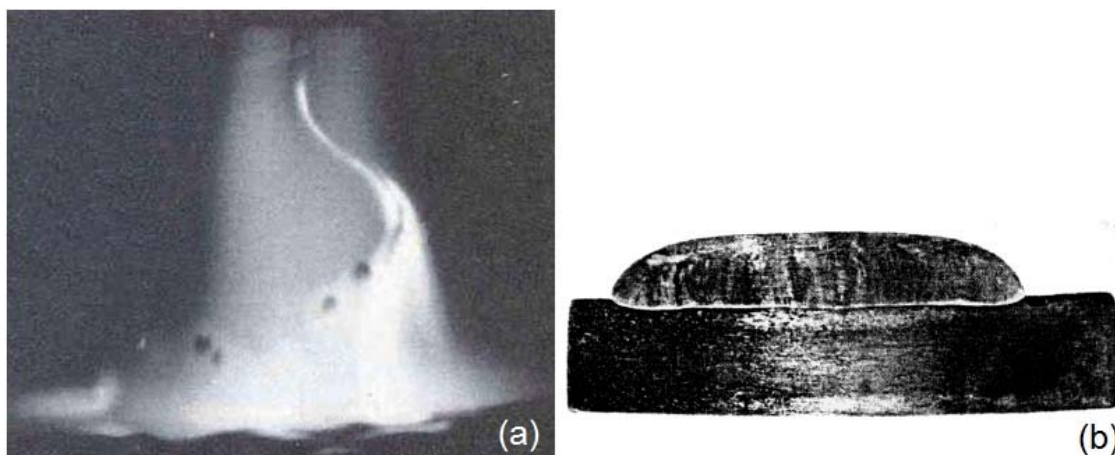


Figura 2.20 – (a) Fotografia de transferência goticular rotacional na soldagem Plasma-MIG com eletrodos na polaridade positiva. Corrente Plasma de 120 A à 45V e corrente MIG/MAG de 300A à 35V. Arame de aço inoxidável de 0,8 mm. (b) seção transversal do corpo de prova obtido em (a). (ESSERS; JELMORINI; TICHELAR, 1972).

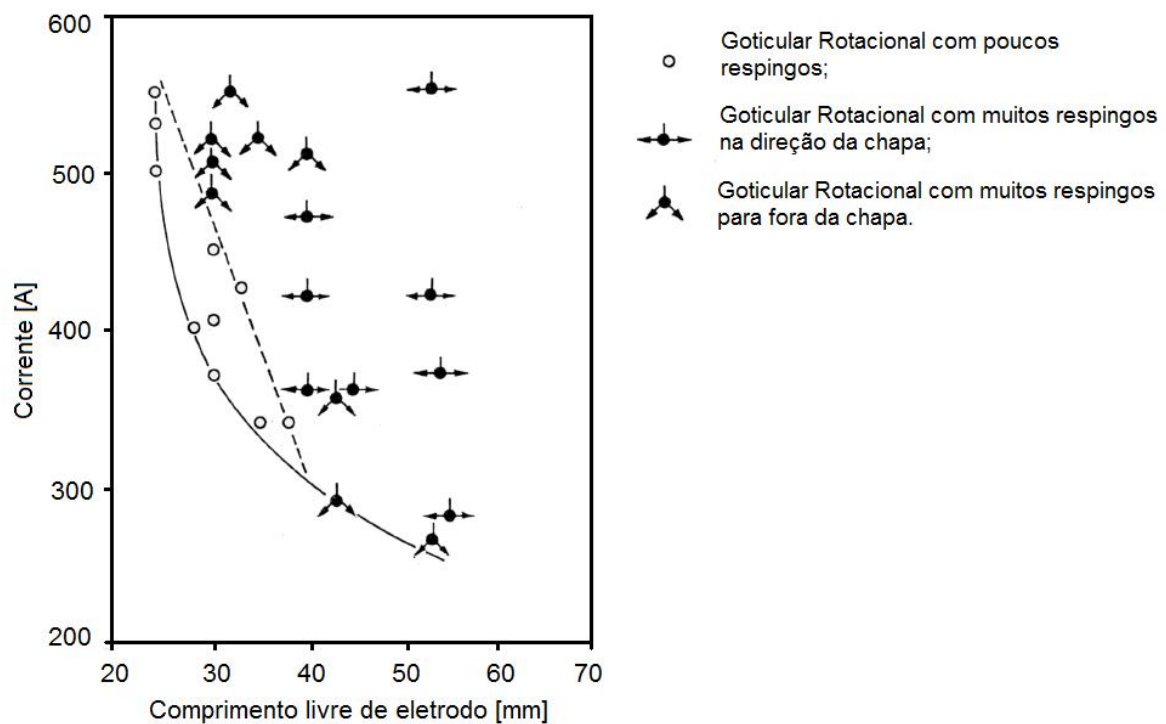


Figura 2.21 – Corrente de Transição de Goticlar Axial para Goticlar Rotacional e quantidade de respingos para Goticlar Rotacional no processo MIG/MAG para eletrodo de aço ao carbono com 1,2 mm. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAAR, 1972).

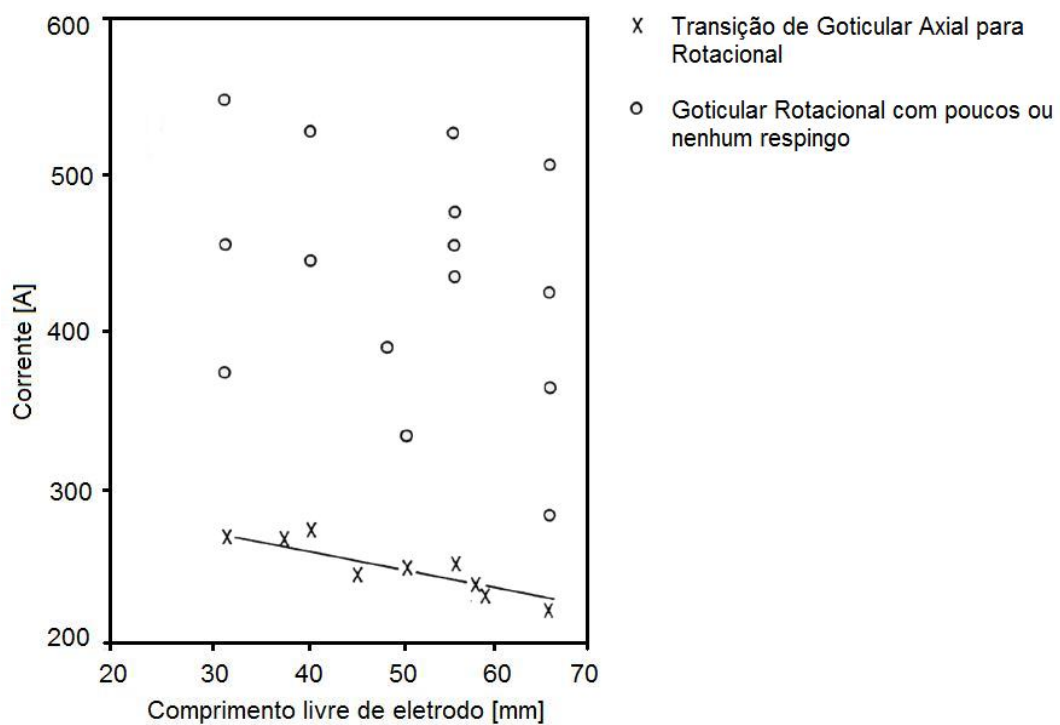


Figura 2.22 - Corrente de Transição de Goticlar Axial para Goticlar Rotacional no processo Plasma-MIG para eletrodo de aço ao carbono com 1,2 mm. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAAR, 1972).

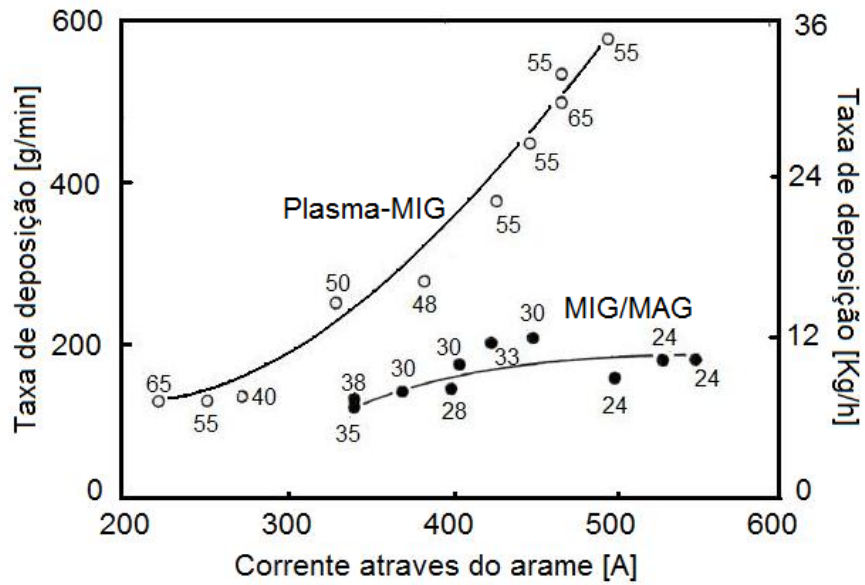


Figura 2.23 – Taxa de deposição em transferência goticular rotacional sem respingos em função do corrente através do arame para diversos comprimentos de eletrodo energizado, indicados para cada ponto. (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972).

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada uma descrição dos equipamentos, acessórios, materiais de consumo com as respectivas especificações, sistema de aquisição de sinais elétricos de corrente e tensão, sistema de filmagem, bem como a montagem da bancada experimental. Também é apresentada a metodologia utilizada na soldagem dos corpos de prova.

3.1 Bancada experimental

A bancada experimental dedicada ao processo Plasma-MIG inclui fontes multiprocessos com capacidade para soldagem a Plasma e MIG/MAG e uma tocha especial para o processo. A tocha Plasma-MIG é acoplada às fontes que normalmente são utilizadas para os processos que o originaram, necessitando apenas de um comando único para as duas fontes. Uma interface microprocessada que faz a seqüência de abertura do arco ("Soft Start") e comandam os parâmetros pré-regulados para o processo. Constituem ainda os equipamentos básicos, um alimentador de arame eletrodo, suporte para os corpos de prova e o sistema de aquisição dos sinais elétricos.

A Figura 3.1 apresenta uma visão geral da bancada experimental, com destaque especial para a tocha Plasma-MIG e identificação dos principais equipamentos e acessórios. Na seqüência da figura, são listados os equipamentos por meio dos correspondentes números.



Figura 3.1 – Fotografia da bancada experimental utilizada.

- 1 - Tocha Plasma-MIG;
- 2 - Fonte MIG/MAG;
- 3 - Fonte Plasma;
- 4 - Unidade de água gelada;
- 5 - Gases para o processo;
- 6 - Sistema de controle para o processo;
- 7 - Sistema de aquisição de sinais elétricos;
- 8 - Medidores de vazão para os gases Plasma e MIG/MAG;
- 9 - Interface responsável pelo controle do cabeçote alimentador;
- 10 - Cabeçote alimentador;
- 11 - Robô.

Maiores detalhes sobre a operação e funcionamento de cada um dos equipamentos mostrados na Figura 3.1 podem ser encontrados no Anexo A deste documento.

3.1.1 Fontes de soldagem para o processo Plasma-MIG

O processo Plasma-MIG necessita de uma fonte com a capacidade para operar o circuito Plasma e outra para operar o circuito MIG/MAG. Portanto, uma empresa ou centro de pesquisas que disponha de duas fontes com essa capacidade, não necessitam obrigatoriamente de adquirir novas fontes de soldagem para utilizar o processo Plasma-MIG.

Sendo assim, neste trabalho, para a parte Plasma do processo, foi utilizada uma fonte eletrônica de soldagem Multiprocessos “Inversal 450”, que pode operar nos processos MIG/MAG, TIG, Plasma e Eletrodo Revestido. Para o presente trabalho esta fonte foi selecionada para operar no processo Plasma, com característica estática do tipo corrente constante e polaridade positiva.

Para a parte MIG/MAG do processo, foi utilizada uma fonte eletrônica de soldagem “Digitec 300”, que pode operar nos processos MIG/MAG, TIG, Plasma e Eletrodo Revestido. Esta fonte foi selecionada para operar no processo MIG/MAG, com característica estática do tipo corrente constante e polaridade positiva.

3.1.2 Tocha Plasma-MIG

Neste trabalho, foi utilizada uma tocha especial que incorpora os processos Plasma e MIG/MAG, de fabricação da empresa TBi, sem os cabos de alimentação. Esta tocha pesa 1700 gramas e mede nas suas dimensões maiores 294 mm (comprimento) e 112 mm (largura). Neste modelo de tocha, o eletrodo responsável pela parte Plasma é de cobre e possui formato anular.

Os elementos principais que constituem a tocha incluem o bico de contato MIG/MAG, o eletrodo anular de cobre, bocal constritor Plasma, bocal de proteção, que estão mostrados de forma esquemática na Figura 3.2, com as devidas proporções respeitadas.

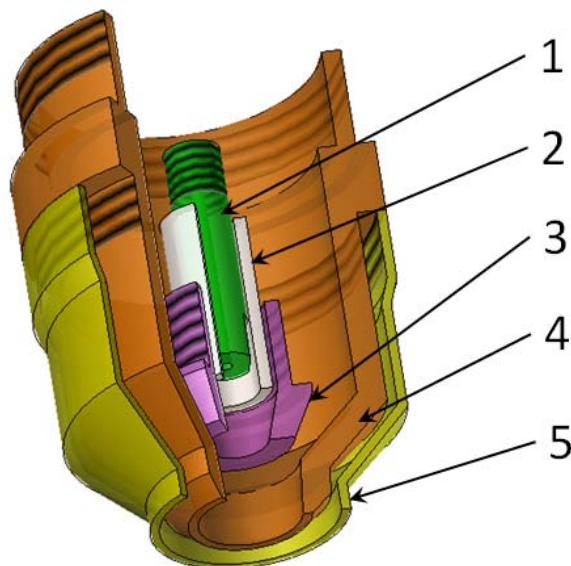


Figura 3.2 – Vista esquemática dos principais elementos da tocha Plasma-MIG. 1 – Bico de contato MIG/MAG; 2 – Isolamento cerâmico; 3 – Eletrodo Plasma; 4 – Bocal constritor Plasma; 5 – Bocal Externo.

Na Figura 3.3 é apresentada a tocha Plasma-MIG em sua concepção comercial utilizada para os ensaios, com destaque aos elementos principais mostrados de forma “explodida”.

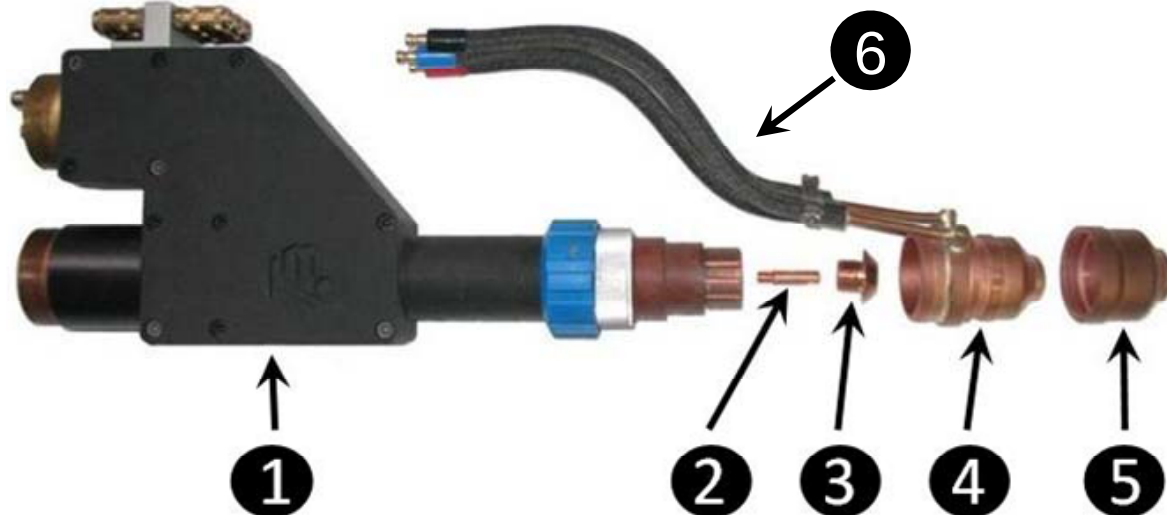


Figura 3.3 - Exemplo de uma tocha comercial para o processo Plasma-MIG de fabricação da empresa TBi em vista explodida. 1 - Corpo da tocha; 2 - Eletrodo MIG/MAG; 3 - Eletrodo Plasma; 4 - Bocal constritor; 5 - Bocal externo; 6 - Mangueiras de refrigeração por água e para passagem da proteção gasosa externa.

Na seqüência, a Figura 3.4 reapresenta a mesma imagem da Figura 3.2, agora em sua vista frontal, com o objetivo de definir e identificar as distâncias de posicionamento dos principais elementos da tocha, e que influem de forma decisiva no comportamento do processo. As distâncias que estão posicionadas na Figura 3.4, correspondem a:

- DTP: Distância da Tocha a Peça;
- RP: Recuo do eletrodo Plasma;
- RM: Recuo do bico de contato MIG/MAG;
- DBCP: Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça.

O valor de RP depende da característica de construção da tocha e corresponde para o modelo utilizado neste trabalho a 9 mm. O valor de RM, também é dependente da característica construtiva da tocha, que é fornecida num valor de 17 mm, quando são usados bicos de contato padrão, e corresponde ao valor que foi utilizado neste trabalho. No entanto, podem ser utilizados bicos de contato de diferentes tamanhos e o RM pode variar no intervalo de 15 a 19 mm (para outros valores, é necessário consultar outro modelo de tocha). Já o valor de DTP pode ser variado simplesmente mudando o posicionamento da

tocha em relação à peça, e para este trabalho, foi utilizado 8 mm, resultando numa DBCP de 26 mm, exceto quando indicado.

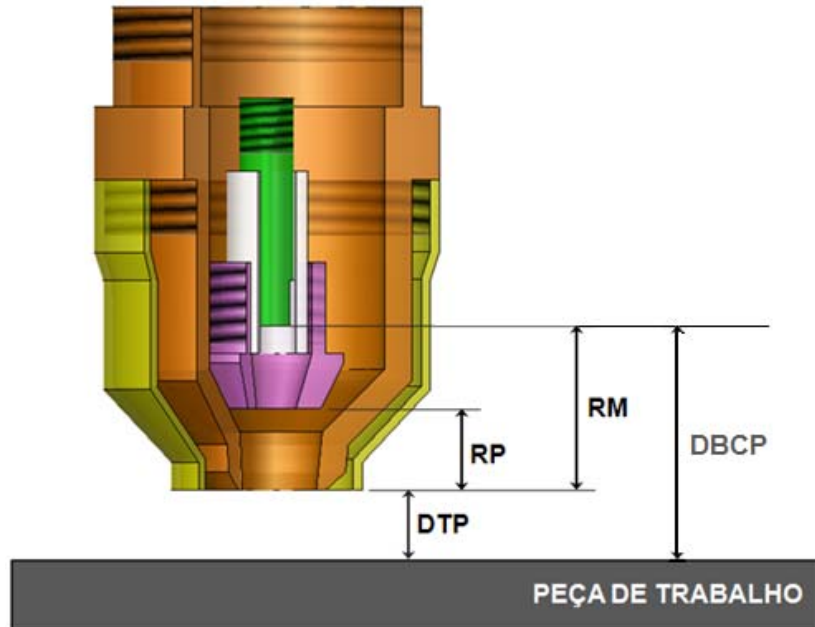


Figura 3.4 – Vista esquemática do posicionamento dos principais elementos da tocha Plasma-MIG. DTP: Distância da Tocha a Peça; RP: Recuo do eletrodo Plasma; RM: Recuo do bico de contato MIG/MAG; DBCP: Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça.

3.1.3 Sistema de alimentação do arame eletrodo

O sistema de alimentação é composto de dois módulos. Um módulo onde estão localizados os rolos alimentadores, os conectores para os cabos da tocha e as conexões de água e gás (Figura 3.5) e outro onde estão localizados os sistemas eletrônicos e a interface com o usuário (Figura 3.6).

É um cabeçote próprio para a soldagem Plasma-MIG, o que diferencia dos tradicionalmente utilizados para a soldagem MIG/MAG convencional, é o sistema eletrônico de controle da rotação do motor de acionamento dos roletes. Opera com um controle eficiente da rotação tanto no sentido horário, quanto no anti-horário e, portanto, é capaz de fazer o recuo do eletrodo consumível, que é uma exigência para a execução do procedimento “Soft Start” de abertura do arco.

O cabeçote alimentador pode operar em duas situações. Primeiro, com a fonte selecionada para operar em modo remoto, neste caso a regulação da velocidade de alimentação é realizado por meio do programa que comanda o processo Plasma-MIG. A segunda situação é com a fonte selecionada para operar no modo local, a regulação da velocidade de alimentação é realizada diretamente no potenciômetro localizado no painel da

interface do cabeçote alimentador, ou no painel da fonte. Esta configuração é utilizada somente para soldagem MIG/MAG.

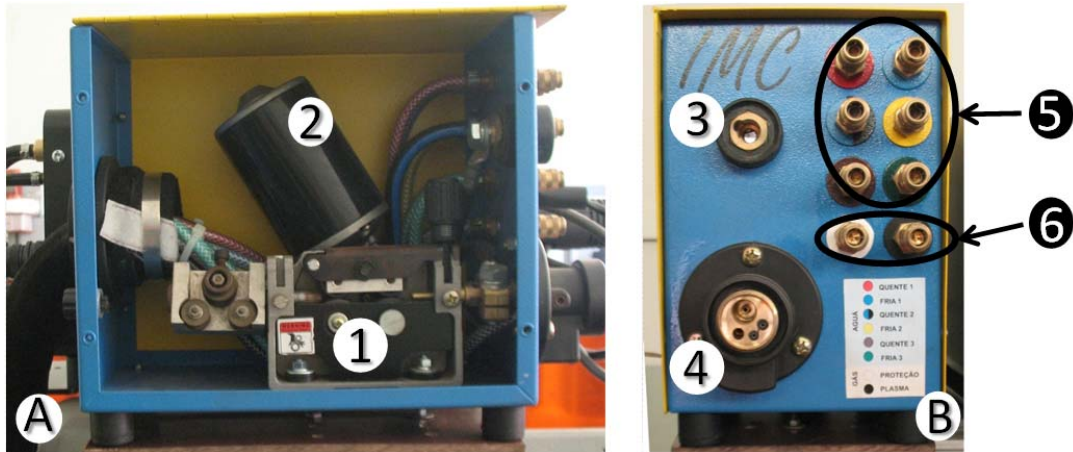


Figura 3.5 – (A) Vista lateral e (B) vista frontal do cabeçote alimentador.

- 1 – Rolos alimentadores;
- 2 – Motor de acionamento dos rolos alimentadores;
- 3 – Conector engate rápido 9 mm fêmea para o cabo Plasma da tocha Plasma-MIG;
- 4 – Euro conector fêmea para o cabo MIG/MAG da tocha Plasma-MIG;
- 5 – Entradas e saídas de água para refrigeração da tocha;
- 6 – Saídas de gases de proteção e Plasma.

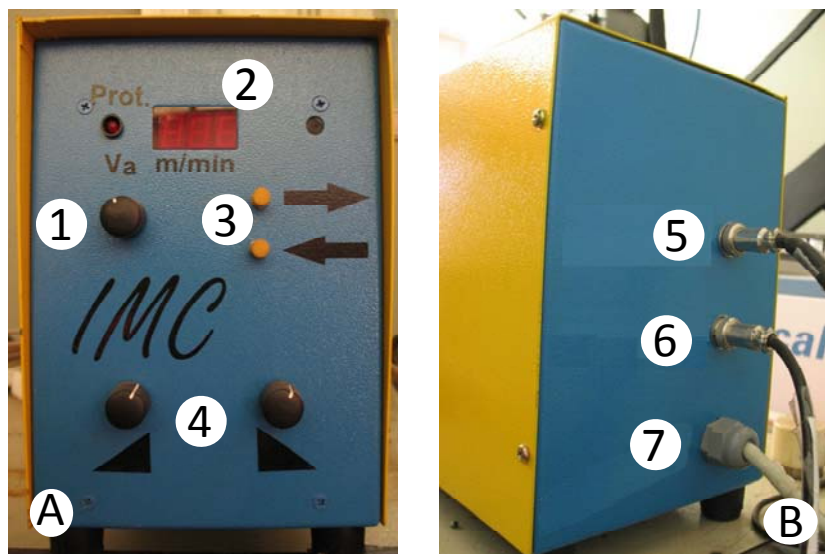


Figura 3.6 - (A) Vista frontal e (B) traseira da interface do cabeçote alimentador.

- 1 - Potenciômetro de ajuste da velocidade de alimentação;
- 2 - Display indicativo da velocidade de alimentação, em m/min;

- 3 - Botões de avanço e retrocesso rápido do arame;
- 4 - Rampas de subida e descida do arame;
- 5 - Interface com o cabeçote;
- 6 - Interface com o sistema de controle (PC);
- 7 - Interface com a fonte MIG/MAG.

Vale ressaltar que a velocidade do arame eletrodo durante as etapas 1 a 6, do procedimento “Soft Start” (Ver item 2.4.4), foi regulada em 1,5 m/min para todos os experimentos.

3.1.4 Unidade de controle microprocessada (Cabeçote + Programa “P-MIG”)

O controle do processo Plasma-MIG é executado por meio de um microcomputador equipado com duas placas de aquisição e controle analógicos e digitais de denominação Interdata (Desenvolvida no Labsolda/UFSC). O controle dos parâmetros é realizado por meio do programa “P-MIG”, que opera em ambiente DOS, também desenvolvido no Labsolda (Figura 3.7).

Neste programa é possível realizar a regulação dos parâmetros listados na sequência, que permitem que as fontes operem apenas com característica estática de corrente constante. Quando o usuário desejar soldar com corrente contínua e constante, é necessário atribuir valores iguais para os parâmetros de base e de pulso, exceto para os tempos, que neste caso não necessitam de regulações:

- Parâmetros MIG/MAG:
 - Corrente MIG/MAG de Pulso;
 - Corrente MIG/MAG de Base;
 - Tempo do Pulso MIG/MAG;
 - Tempo da Base MIG/MAG;
 - Velocidade do Arame;
- Parâmetros Plasma:
 - Corrente Plasma de Pulso;
 - Corrente Plasma de Base;
 - Tempo de pulso da corrente Plasma;
 - Tempo de base da corrente Plasma;
 - Tempo da rampa de descida.
- Parâmetros do “Soft Start”
 - Corrente Plasma de Pré-Aquecimento;

- Tempo de Pré-Aquecimento;
- Tempo de defasagem entre os pulsos de corrente Plasma e MIG/MAG;
- Corrente de abertura;
- Velocidade de aproximação e retrocesso do arame.

P L A S M A / M I G V 2.21

CORRENTE MIG

corrente de base	[A] :	100.00	tempo Base	[ms] :	8.00
corrente de pulso	[A] :	280.00	tempo pulso	[ms] :	4.20
cor. med. sinerGico	[A] :	161.97	Vel. arame	[m/min] :	7.70

CORRENTE PLASMA

corrente de base	[A] :	0.00	cor. de finalizaçao	[A] :	0.00
Corrente de pulso	[A] :	0.00	Tempo de finalizaçao	[s] :	0.30
			tempo de rampa desc.	[s] :	2.00

GERAIS

corrente preaquec.	[A] :	100.00
tempo preaquecime.	[s] :	0.00
defasagem	[ms] :	7.90
corrente de abert.	[A] :	50.00
velocidade aprox	[m/min] :	1.00

TECLAS DE FUNCAO

Q - SAIR
H - ABERTURA
ESPACO - DESLIGA

SITUACAO

ETAPA	[	PROTECAO	]
IsP1	{	Ua1	}
Ua	{	IS	}

Figura 3.7 - Tela de apresentação do programa P-MIG, versão 2.21.

3.1.5 Sistema de refrigeração

Processos de soldagem que operam com altas densidades de corrente, como o Plasma-MIG, MIG/MAG Duplo-Arame, ou até mesmo o MIG/MAG, são afetados de forma negativa com a deterioração em demasia dos seus componentes, com destaque ao bocal de proteção externo, e no caso do Plasma-MIG, o bocal constritor e o eletrodo anular de cobre, além do bico de contato que pode dificultar a passagem do arame e provocar instabilidades ao processo, quando o mesmo está sob alta temperatura.

No caso do processo Plasma-MIG, o sistema de refrigeração mostrou ser um fator decisivo na conservação dos componentes principais da tocha Plasma-MIG. Para os testes iniciais foram utilizados apenas os sistemas de resfriamento das fontes e um sistema externo com características semelhantes ao das fontes. Durante esta etapa, os componentes da tocha sofreram um desgaste acelerado, sendo que a parte mais

prejudicada foi o eletrodo de cobre, e em sequência o conjunto bocal constritor e bocal externo.

Com a finalidade de reduzir o desgaste dos componentes da tocha e permitir que o processo opere em uma condição favorável, foi adquirida uma unidade de refrigeração de água (na Figura 3.8 é mostrado o painel frontal do equipamento). Esta unidade utiliza como fluido de trabalho água da rede pública e é capaz de operar numa faixa padrão de 5 a 25 °C. No presente trabalho a temperatura foi mantida em 17 °C, o que promoveu um ganho significativo na preservação dos componentes da tocha.

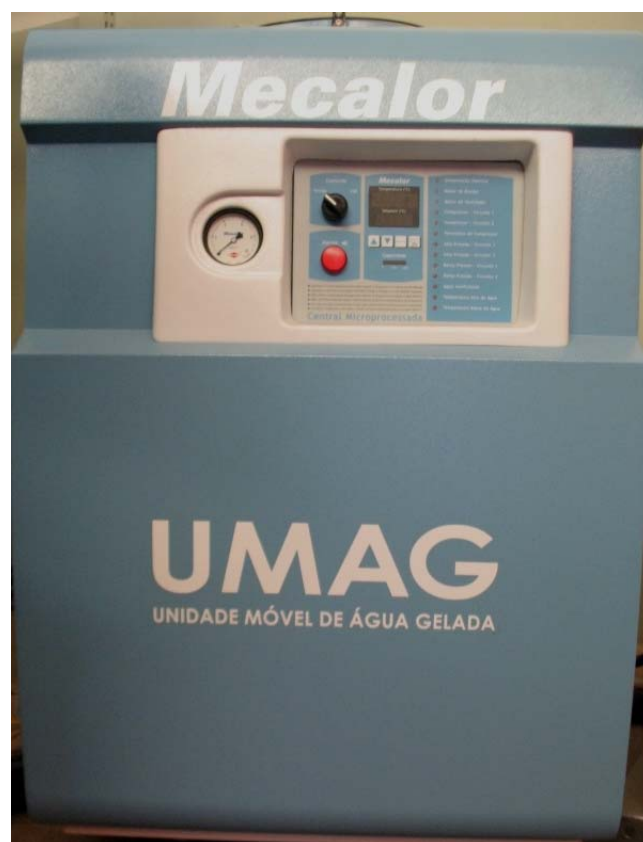


Figura 3.8 - Unidade Móvel de refrigeração de água, Fabricante Mecalor, Modelo: UMAG MAS-9-RI-220.

A montagem da unidade de água gelada foi realizada de acordo com o esquema hidráulico mostrado na Figura 3.9. Foi instalado um sistema de “by-pass” interligando a saída de água gelada e o retorno de água quente, que no caso de não existir nenhum equipamento conectado, deve permanecer com a válvula totalmente aberta para permitir o retorno da água para o reservatório e evitar problemas de funcionamento no equipamento. No caso de existir equipamento conectado (Tocha Plasma-MIG), a válvula deve então ser gradualmente fechada, aumentando desta forma a pressão no lado da saída de água, o que

obriga a passagem da água pela tocha Plasma-MIG e o retorno ao reservatório pelo lado de menor pressão. Na Figura 3.10 é apresentada uma fotografia do “by pass”, com destaque para os engates rápidos, válvula de gaveta e sensores de fluxo.

Nas Figura 3.9 e 3.10, também é mostrada a presença de sensores de fluxo. Eles são ligados em série e conectados ao computador de controle. Se a passagem de água em algum dos circuitos for bloqueada, o software “P-MIG” desliga o processo para evitar que algum componente vital da tocha seja danificado.

O fabricante do equipamento recomenda que a bomba de circulação de água opere numa faixa de pressão entre 2,5 e 3,5 kgf/cm², que é suficiente para garantir uma vazão na faixa de 1,5 a 2 l/min em cada um dos circuitos de refrigeração. O ajuste de vazão e pressão é realizado através da válvula de gaveta, quanto mais fechada, maior é a pressão de operação e maior é a vazão de água pela tocha.

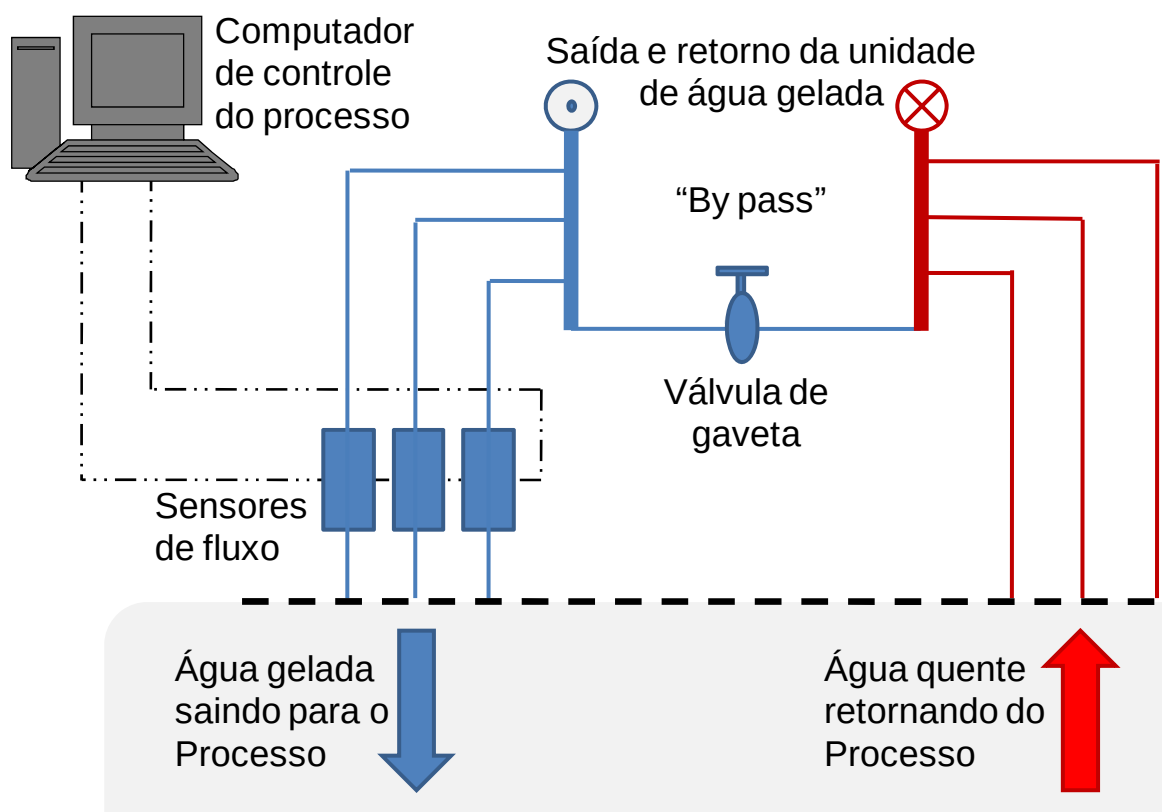


Figura 3.9 - Esquema hidráulico da saída e retorno da unidade de refrigeração, e esquema elétrico dos sensores de fluxo.

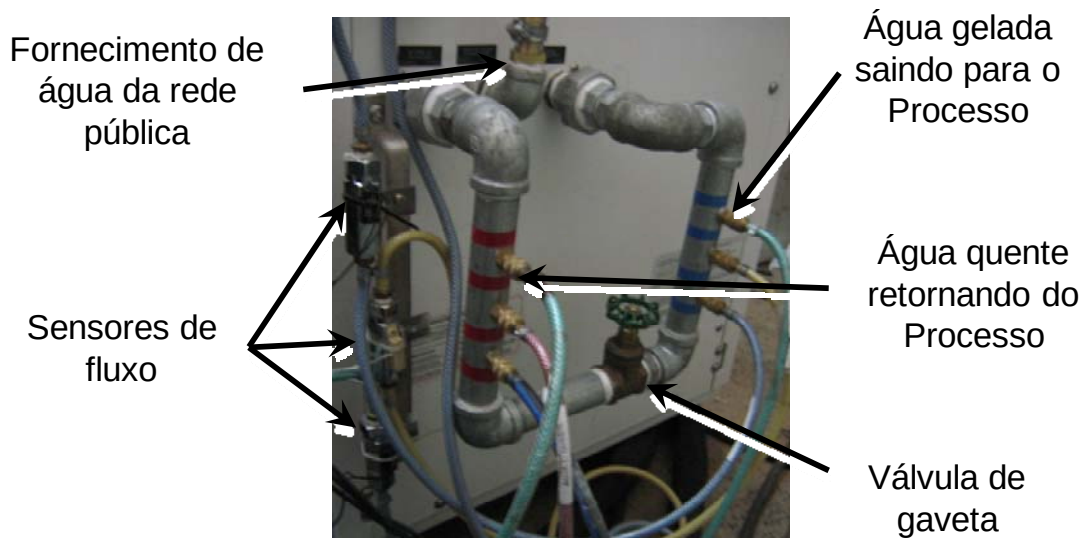


Figura 3.10 - Vista do “by-pass” com válvula de gaveta e engates rápidos para mangueiras de água.

3.2 Robô

A automação, e em particular a robótica, tem ocupado um lugar cada vez mais importante nos diversos segmentos de atividades industriais, realizando tarefas difíceis ou até mesmo impossíveis para os operadores, com um ganho considerável de produtividade, flexibilidade e repetibilidade com redução de custos, dentre outros. Dentre as atividades realizadas por robôs em ambientes fabris, podem ser citadas: montagens, movimentação de peças e materiais, pintura e soldagem.

Dentre as vantagens de utilizar robôs em processos de soldagem a arco, destaca a facilidade de operação, maior confiabilidade nos parâmetros de deslocamento do robô (velocidade de soldagem), facilidade na marcação de pontos e definição de trajetórias, facilidade em alterar parâmetros, e a possibilidade de integração entre o robô e as fontes de soldagem.

Seguindo esta tendência, os centros de pesquisas, também tem investido recursos na automatização e robotização de seus processos, o Laprosolda/UFU, que já contava com sistemas de movimentação de tocha e/ou corpos de prova, além de mesas controladas por computador, adquiriu nos anos de 2006 e 2007, dois robôs para soldagem, sendo que um deles é totalmente dedicado a soldagem Plasma-MIG.

O robô que foi utilizado neste trabalho, que integra a bancada Plasma-MIG, é um robô de 6 GDL (**G**raus **D**e **L**iberdade) fabricado pela Motomam, modelo HP20 com capacidade de carga de 20 kg no centro do punho, acionado por um controlador NX100. A

Figura 3.11 mostra a tocha Plasma-MIG fixada ao robô. Nesta figura é mostrado também o suporte para tocha e sensor de impacto. A presença deste sensor é importante para evitar avarias tanto na tocha, quanto no robô (ele possui a finalidade de interromper o movimento em casos de colisões, que podem ocorrer ou por erro de programação ou por interrupção do caminho).

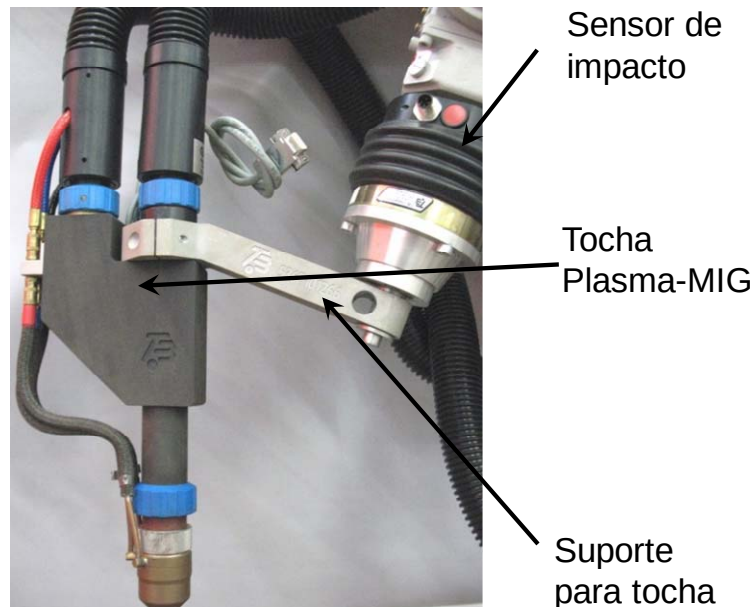


Figura 3.11 – Detalhe de fixação da tocha Plasma-MIG, suporte e sensor de impacto.

3.3 Equipamentos de filmagem

Para visualização da transferência metálica e dos fenômenos correlatos, foi empregada uma câmera digital capaz de filmar a 2000 qps (quadros por segundo) utilizando a técnica de filmagem direta do arco de soldagem.

A técnica consiste basicamente em focar a câmera sobre a região de interesse, próximo ao arco de soldagem (pode incluir tocha, eletrodo, gotas, cordão e chapa), em seguida inserir um conjunto de filtros neutros entre o arco e a câmera. Esses filtros são capazes de reduzir a intensidade luminosa do arco sem cortar nenhuma frequência de onda.

Para permitir visualização também do arco, foi necessário penalizar a definição das gotas em formação e a transferência metálica, através da intensidade dos filtros ópticos usados (filtros neutros que reduzem a intensidade luminosa sem cortar comprimentos de onda da luz emitida pelo arco de solda). Para trabalhos futuros pode ser empregada a técnica “Perfilografica”, se existir o interesse de obter melhores definições de imagem.

Os sinais elétricos (corrente e tensão) foram sincronizados com os quadros de filmagem para correlacionar a variação da tensão e corrente com a formação e destacamento das gotas.

Um grande diferencial da técnica aqui utilizada é a eliminação de parte do conjunto de lentes convergentes e divergentes e da fonte de laser que são necessárias à técnica Perfilográfica. Com a técnica utilizada neste trabalho, não é mais necessário um perfeito alinhamento entre o sistema óptico e a câmera, o que a torna mais simples de ser aplicada.

Para a realização dos experimentos foi então utilizada uma bancada como esquematizada na Figura 3.12, que constitui basicamente de uma mesa para o deslocamento dos corpos de prova, que permite que a tocha, e conseqüentemente o arco permaneçam parados em relação à câmera, um vidro de proteção, para evitar que possíveis respingos danifiquem a câmera e/ou o jogo de lentes e filtros neutros, e finalmente, da câmera de alta velocidade.

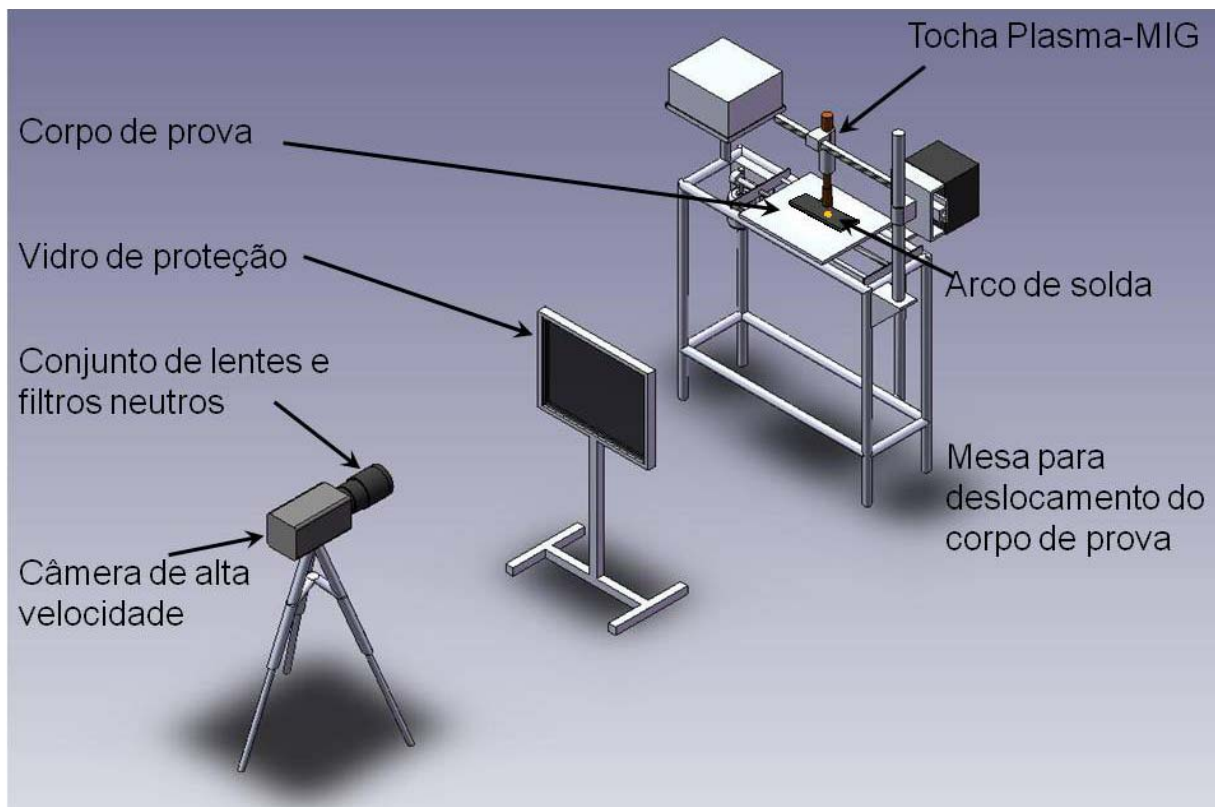


Figura 3.12 - Esquema do equipamento de filmagem, com destaque à câmera de alta velocidade e a mesa de deslocamento do corpo de prova.

3.4 Consumíveis

3.4.1 Gases

O processo Plasma-MIG exige o fornecimento independente de três gases, o gás MIG/MAG, de Plasma e de Proteção. O gás MIG/MAG pode ser ativo ou inerte, ou ainda mistura destes, dependendo principalmente do material, faixa de corrente e polaridade. O tipo de gás influencia as características do arco, os modos de transferência de metal, os aspectos geométricos e estéticos do cordão de solda, a velocidade e os custos do processo, dentre outros.

Para os primeiros testes, a escolha dos gases de proteção foi embasada nos trabalhos de Oliveira (2006), resultando na seleção de uma mistura ativa de Ar/4%CO₂ como gás MIG/MAG e Argônio puro para o gás de Plasma e de proteção externa.

Com o decorrer do trabalho, a mistura ativa foi transferida para o gás de proteção externo, agora com uma porcentagem maior de CO₂ (Ar/8%CO₂). O Argônio puro foi utilizado para os gases Plasma e MIG/MAG. A utilização da mistura ativa no gás de proteção externo foi motivada pelo fato de que este é o gás de maior vazão para o processo e a utilização de Argônio puro passa atualmente por inconvenientes como alto custo e escassez no mercado. Quanto à estabilidade do processo, não foram observadas perdas. Outro ponto favorável é o fato de que a mistura ativa não entra em contato com o eletrodo Plasma e, considerando que o arco produzido por Argônio é mais “frio” que o arco proveniente de misturas com CO₂ (LYTTLE; STAPON, 1990), um menor desgaste devido ao aquecimento é provocado no eletrodo Plasma.

Todos os gases utilizados neste trabalho estão disponíveis comercialmente e são apresentados na Tabela 3.1, com a indicação dos capítulos onde foram aplicados.

Tabela 3.1 – Gases a serem utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

	Gás MIG/MAG	Gás de Plasma	Gás de Proteção
Capítulos IV e VI	Ar/4%CO ₂	Ar	Ar
Capítulos V e VII	Ar	Ar	Ar/8%CO ₂
Vazão (l/min)	5	5	15

3.4.2 Metal de adição

A maioria das soldas foram realizadas com arame maciço de aço ao carbono da classe AWS ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro. A escolha do tipo e diâmetro de eletrodo está relacionada ao fato de já existirem trabalhos prévios com esse tipo de arame aplicado ao processo Plasma-MIG (OLIVEIRA, 2006), que servirão como base de comparação, e

também pelo fato de que esses eletrodos são amplamente utilizados na soldagem de componentes de aço ao carbono.

Alguns testes foram realizados utilizando o arame tubular auto-protegido para aplicações em operações de revestimentos duro, DIN 32522 – BFB 1 66 AC MPH 10 de 1,6 mm de diâmetro. A motivação para utilizar este tipo de arame partiu da observação de que ocorre um auto índice de trincas, principalmente transversais, quando o mesmo é empregado em aplicações de revestimento utilizando uma tocha para soldagem MIG/MAG convencional. Este arame foi utilizado na tocha para o processo Plasma-MIG com o intuito de verificar se o arco Plasma é capaz de reduzir ou até mesmo eliminar a quantidade de trincas, e também para verificar o efeito da corrente Plasma na diluição e comparar com as obtidas para aços de baixo carbono.

3.4.3 Metal de base

Todos os corpos de prova utilizados neste trabalho foram confeccionados em aço com baixo teor de carbono. As soldas foram realizadas sobre as chapas na forma “como recebida”, lavadas e escovadas com escova manual. Os testes de simples deposição sobre chapa foram executados sobre chapas de dimensões como mostrado na Figura 3.13, sendo que $L=6,35$ mm para todos os testes, exceto os executados com arame tubular, onde $L=12,7$ mm

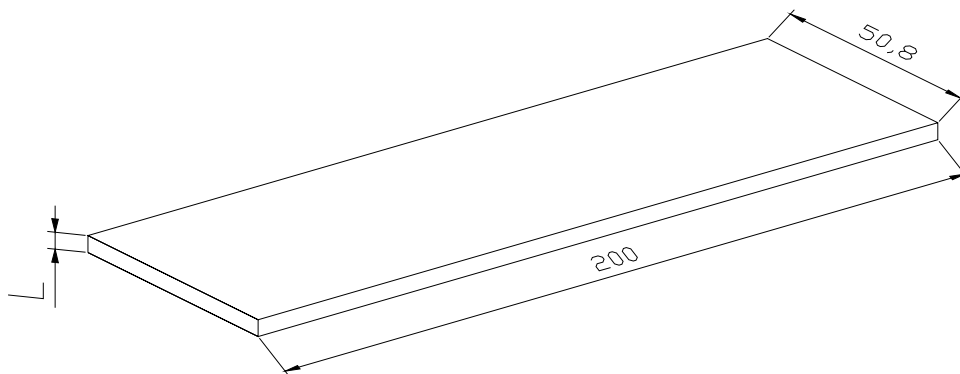


Figura 3.13 – Corpos de Prova para simples deposição sobre chapa (“bead on plate”). Cotas em mm.

Os testes de deposição em juntas foram executados em juntas chanfradas como a da Figura 3.14, com ângulo de junta igual a 60° , abertura de raiz de 3 mm e cobre junta de aço ao carbono com espessura de 3,17 mm.

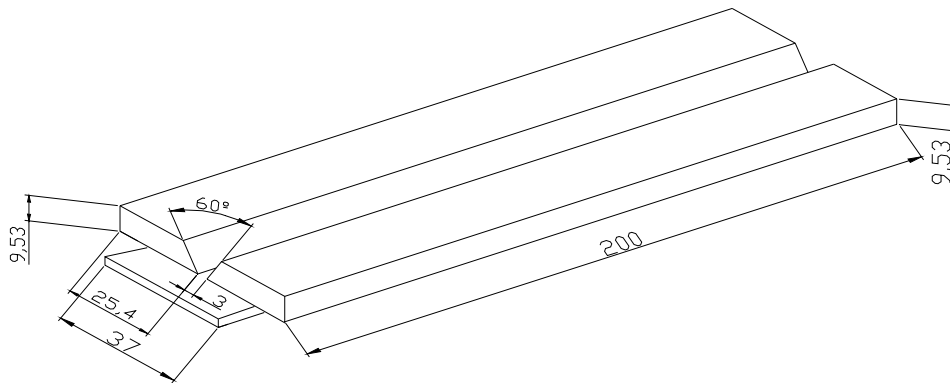


Figura 3.14 – Corpo de prova para solda em junta chanfrada. Cotas em mm.

3.5 Sistemas de aquisição e tratamento de dados

Antes de definir o tipo de sistema para a aquisição, é necessário primeiramente definir o que se pretende medir, e o mais importante, onde e como medir. O processo Plasma-MIG, em particular, apresenta uma dificuldade a mais, já que são dois processos que resultam em um só, ou seja, um processo híbrido. Como resultado, aumenta a dificuldade em monitorar os sinais elétricos de corrente e tensão, tanto do arco híbrido, quanto do arco Plasma que envolve o comprimento livre de eletrodo e o próprio arco híbrido. Como não é objetivo desse trabalho monitorar os arcos propriamente ditos, decidiu-se por monitorar os sinais elétricos dos circuitos Plasma e MIG/MAG. Para tanto, os sinais de tensão adquiridos, correspondem à porção entre o final da tocha Plasma-MIG e o início dos cabos de corrente (Figura 3.15) e a mesa onde eram apoiados os corpos de prova, os sinais de corrente foram medidos diretamente nos cabos de corrente por meio de sensores Hall.

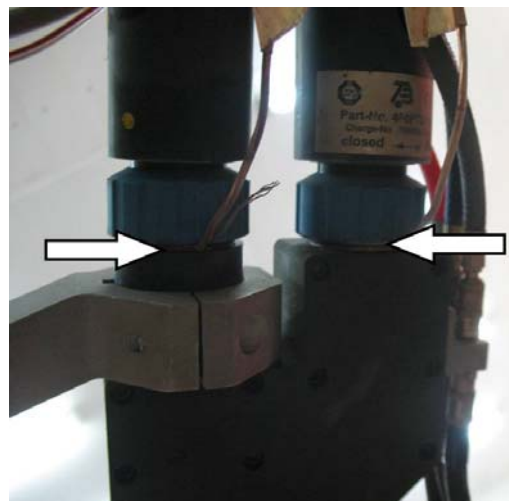


Figura 3.15 – Indicação da posição onde os sinais elétricos de tensão foram coletados.

Para aquisição de corrente utilizou-se, como transdutor/condicionador de sinal, um sensor Hall e para aquisição da tensão de soldagem um divisor de tensão, que fornecem como saída, um sinal de tensão na faixa de ± 10 V, que corresponde exatamente à faixa de medição da placa de aquisição da National Instruments Modelo USB 6009 com uma resolução de 14 bits. Para uma faixa de medição do sensor Hall de ± 500 A, resulta numa resolução de medição, calculada pela razão (faixa de medição do sensor hall/resolução da placa) de 0,06 A para a corrente. De maneira similar, para uma faixa de medição de ± 100 V do divisor de tensão, resulta numa resolução de medição de 0,01 V para a tensão.

A placa de aquisição da National Instruments (NI USB-6009) (Figura 3.16), é comandada por um programa desenvolvido em ambiente LabVIEW chamado de Aquisição_PM.vi (Figura 3.17), que faz a aquisição e armazenamento dos dados relativos aos sinais. No programa, podem ser ajustados os valores de frequência de aquisição, o tempo de aquisição e os canais a serem utilizados.



Figura 3.15 - Placa de aquisição tipo “Plug and Play” da National Instruments modelo: NI USB-6009.

O tratamento dos dados é realizado no software OriginPro 7.5[®] que permite abrir, manipular (selecionar faixas de tempo dos sinais que se deseja trabalhar), sincronizar e tratar os dados gravados pelo primeiro programa.

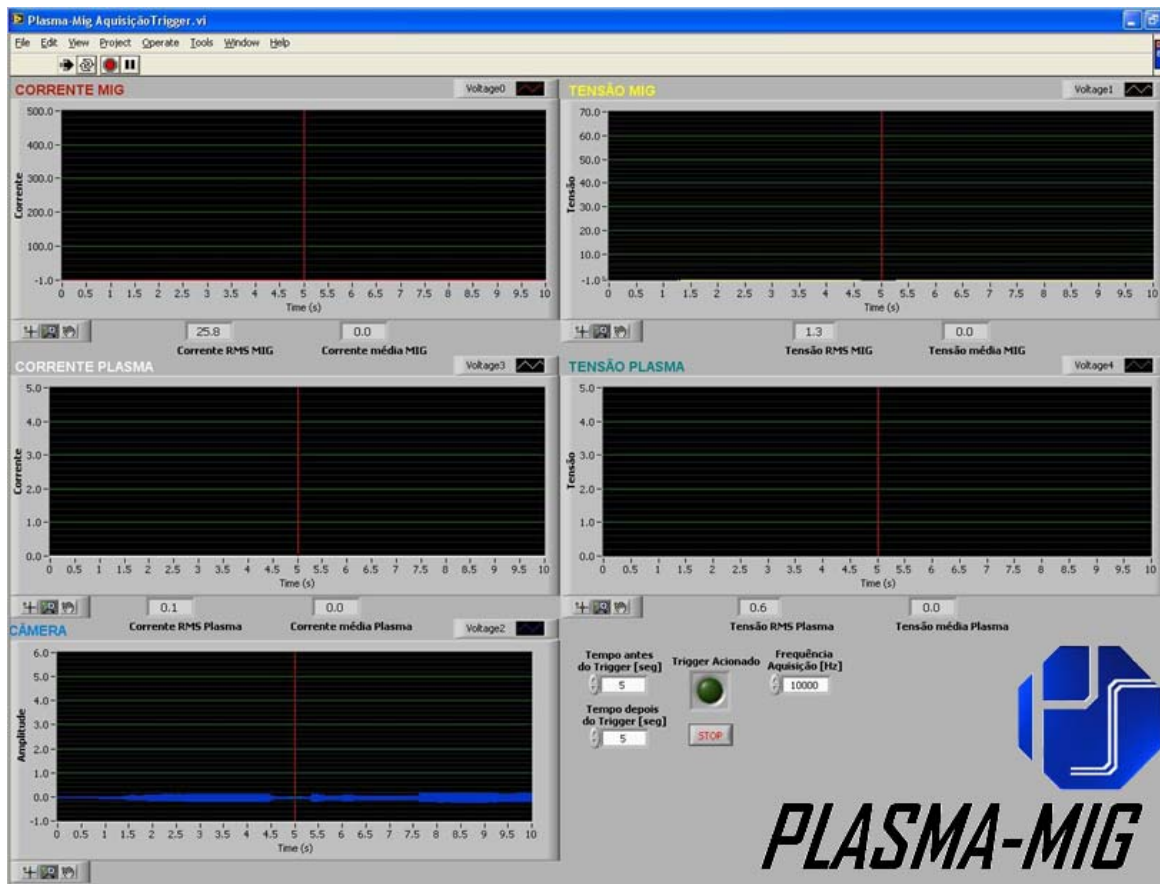


Figura 3.16 - Interface do sistema de aquisição de dados.

3.6 Metodologias de Soldagem

Para as soldas referentes ao Capítulo VI, a tocha permaneceu parada e a velocidade de soldagem foi dada por uma mesa de movimentação de corpo de prova, como esquematizado no item referente à filmagem (Item 3.3).

Todo o restante dos experimentos foi realizado de forma robotizada, com velocidade de soldagem e movimentação da tocha controladas por robô. O ângulo de trabalho do eletrodo utilizado foi de 0° (chapa na posição horizontal e tocha na posição vertical). Após a regulagem de todos os parâmetros de soldagem por meio do programa “P-MIG” e o correto posicionamento da tocha de soldagem, o processo pode ser iniciado. Primeiramente, é iniciado o arco MIG/MAG de baixa potência, em seguida, o arco Plasma, logo após, é acionado o movimento de avanço do arame e fornecido potência ao arco MIG/MAG (“Soft Start” – Item 2.4.4). Com o processo totalmente iniciado, o sistema de movimentação da tocha é acionado.

Durante a soldagem, foram adquiridos os sinais de corrente e tensão de soldagem dos circuitos Plasma e MIG/MAG. No caso dos testes que objetivam visualizar e estudar os fenômenos de transferência metálica e estabilidade do arco foi também utilizado a técnica de visualização do arco de soldagem apresentada no Item 3.3. Encerrada a soldagem, o corpo de prova foi substituído e devidamente identificado para a execução do próximo teste.

Ambas as fontes de Soldagem foram programadas para operar no modo corrente constante, com os eletrodos conectados ao pólo positivo da fonte (polaridade inversa ou CC+).

Para as análises de geometria dos corpos de prova, as seções foram realizadas no centro do corpo de prova e a 30 mm do fim do cordão, de acordo com o indicado na Figura 3.18, e as medidas foram realizadas de acordo com a Figura 3.19.

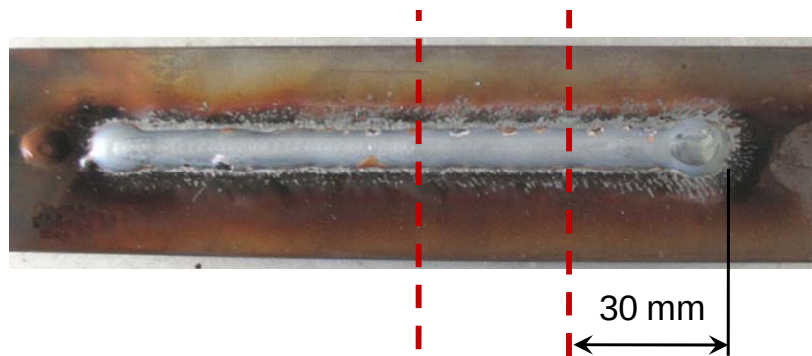


Figura 3.17 – Indicação da região de seccionamento dos corpos de prova, no centro e a 30 mm do fim do cordão.

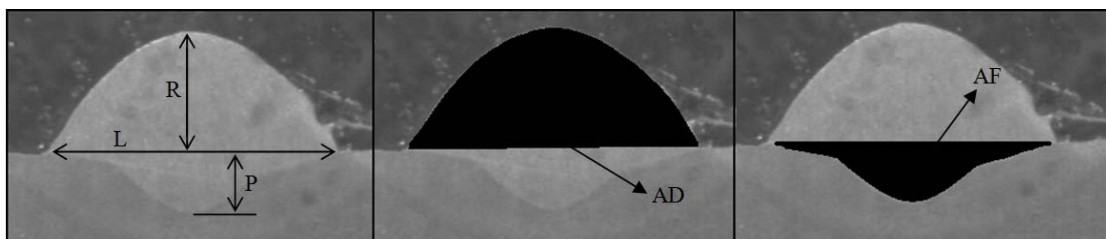


Figura 3.18 - Vista dos parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda.
Nota: L = Largura, R = Reforço, P=Penetração, AF = Área Fundida, AD = Área Depositada.

CAPÍTULO IV

MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM PLASMA-MIG NO LABORATÓRIO E TESTES PRELIMINARES

Neste capítulo são apresentados os primeiros resultados de soldagem Plasma-MIG no Laprosolda/UFU. Esta primeira etapa teve como objetivo conhecer e explorar as potencialidades do processo, identificar e solucionar os principais problemas associados, bem como direcionar o prosseguimento do trabalho.

4.1 Principais dificuldades em utilizar o processo Plasma-MIG

A implantação do processo Plasma-MIG no Laprosolda/UFU pode ser dividida basicamente em quatro etapas, a saber. A primeira trata da instalação e treinamento de operação do robô. Em seguida, instalação e treinamento de operação do equipamento para soldagem Plasma-MIG. Logo após, a execução dos testes preliminares. E, por fim, a realização de soldagens para o desenvolvimento desta dissertação.

A primeira etapa, de instalação e treinamento para operação do robô incluiu a avaliação do “*lay-out*”, instalação do sistema elétrico, instalação de um sensor de impacto e treinamento no controlador Motoman NX100.

A segunda etapa de instalação do equipamento dedicado para a soldagem Plasma-MIG, incluiu basicamente a integração de duas fontes de soldagem a um cabeçote alimentador especial, por meio de placas de aquisição e controle Interdata e do Programa “P-MIG”, desenvolvidos pelo Labsolda/UFSC. Nesta etapa, também foi desenvolvido o programa para aquisição de dados na plataforma LabView, bem como realizada a calibração

do sistema. Também, foram instalados os sistemas de controle de vazão de gás e demais acessórios.

A terceira etapa é tratada com maiores detalhes no decorrer deste capítulo. Nela foram identificados e apresentadas soluções aos principais problemas quanto à utilização do processo. Serviu também como etapa de treinamento e direcionou a continuação do trabalho, que se trata da quarta etapa.

4.1.1 Problemas na abertura do arco

A principal dificuldade encontrada durante a abertura do arco esteve associada a não presença de tensão em vazio na fonte Plasma, como mostrado no oscilograma da Figura 4.1. Com isso, o procedimento “Soft Start” não se conclui e o processo não é iniciado.

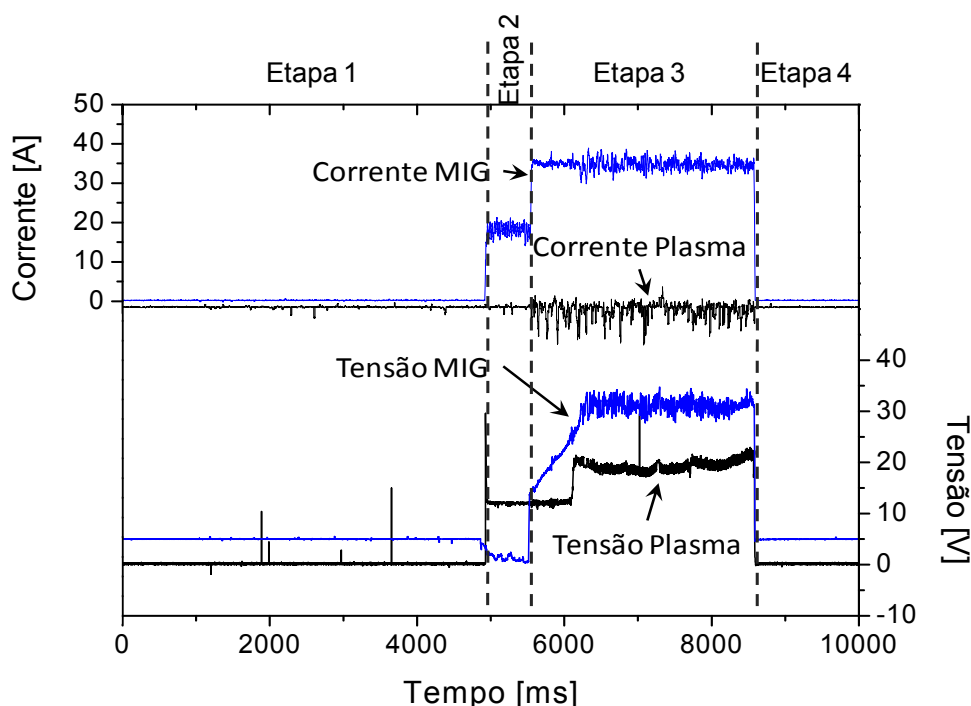


Figura 4.1 - Oscilograma de uma abertura de arco que falhou por falta de tensão na fonte Plasma, com a identificação das etapas relativas ao procedimento de abertura do arco “Soft Start”.

Comparando a Figura 4.1, com a Figura 2.13 (esquema de abertura do arco pelo procedimento “Soft Start” – Capítulo II), pode ser observado que já ocorreu um problema na Etapa 1. No caso, a fonte MIG/MAG apresenta de forma adequada a tensão de referência (≈ 6 V), no entanto, a fonte Plasma ainda não apresentava tensão em vazio. Mesmo com a fonte Plasma sem tensão em vazio, o arame avançou em direção à peça. Na Etapa 2 foi

identificado o toque do arame na peça. Na Etapa 3, o arame retrocedeu em direção ao eletrodo Plasma, com um arco MIG/MAG de baixa intensidade. Até esse ponto, a ausência da tensão em vazio na Fonte Plasma não teria prejudicado o processo de abertura do arco. No entanto, na Etapa 4, a fonte Plasma deveria apresentar tensão em vazio, aguardando apenas a aproximação do arco MIG/MAG com uma atmosfera já ionizada, para fornecer as condições necessárias para a abertura do arco Plasma. Como a fonte Plasma não apresenta a tensão em vazio (≈ 60 V), o programa “P-MIG” identifica a falha e o processo é finalmente interrompido.

Este problema ocorre sempre que a fonte demora um tempo excessivo para “subir” a tensão após o acionamento do processo. O inconveniente foi solucionado com a substituição da fonte Plasma por outra similar, capaz de fornecer tensão em vazio imediatamente após o acionamento.

Também durante a abertura do arco, pode acontecer a formação do “*ninho de passarinho*”, que ocorre devido a regulação inadequada da velocidade de alimentação para as correntes de soldagem selecionadas. Esta é uma situação comum, tanto na soldagem MIG/MAG, quanto na soldagem Plasma-MIG, quando são utilizadas fontes operando com característica estática de corrente constante. Quando o arame toca a peça, o arco não abre e o arame é aquecido por efeito joule e enrola na peça, adquirindo um aspecto semelhante a um ninho de passarinho. O problema é minimizado ao se conhecer a relação entre as correntes e o consumo do eletrodo.

4.1.2 Extinção do arco Plasma

Outro problema que pode ocorrer durante a soldagem é a extinção do arco Plasma. Como a corrente Plasma também contribui para a fusão do eletrodo e o processo opera com corrente constante, na maioria dos casos, a extinção do mesmo reduz a taxa de fusão do eletrodo, e faz com que ocorram curtos-circuitos entre o eletrodo e a peça, resultando em instabilidades e interrupção do processo.

Em algumas situações ocorreram extinções do arco Plasma apenas por um pequeno período de tempo, se restabelecendo novamente, como mostrada na região destacada da Figura 4.2, que não são suficientes para interromper o processo, no entanto são capazes de gerar instabilidades no arco, defeitos na solda no ponto em que ocorre, e respingos na superfície da chapa.

Isto ocorreu para menores valores de corrente no circuito Plasma, provavelmente porque o volume do arco Plasma ainda é reduzido e qualquer instabilidade no processo é capaz de extinguir seu arco. Para maiores valores de corrente no circuito Plasma, o arco raramente era extinto.

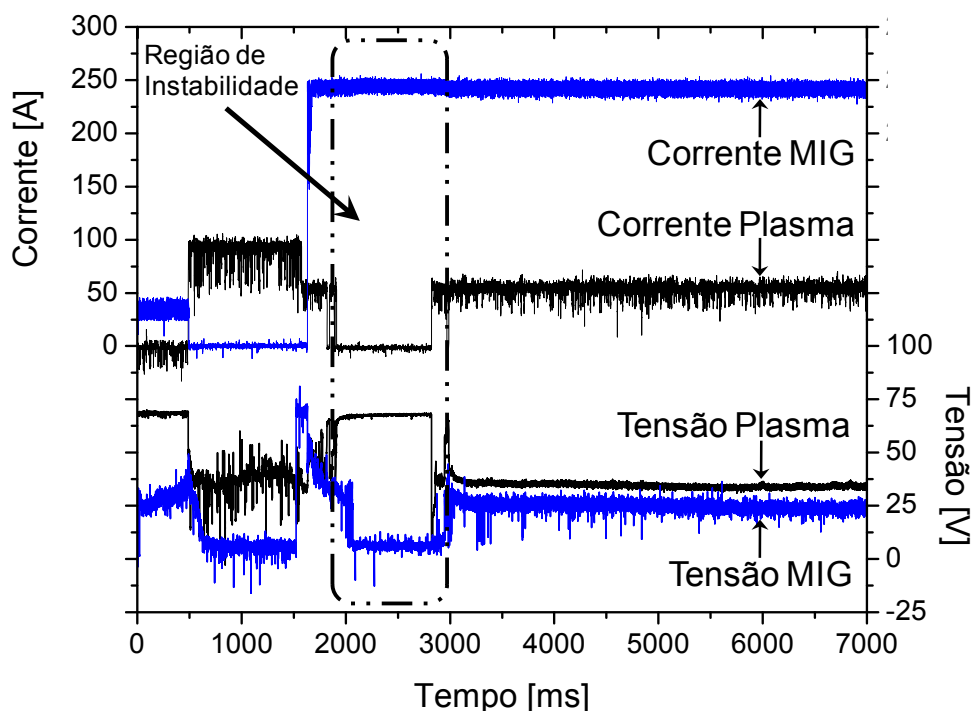


Figura 4.2 - Extinção momentânea do arco Plasma no início do cordão.

4.1.3 Instabilidade do Processo Plasma-MIG

Os oscilogramas da Figura 4.3 indicam que o processo opera estável na sua primeira metade. No entanto, na segunda metade, por algum motivo que pode ser uma oscilação na velocidade de alimentação do arame, aparecem algumas oscilações na tensão do circuito MIG/MAG até um ponto em que a tensão se aproxima de zero, indicando a ocorrência de um curto-circuito entre a ponta do eletrodo e a peça. Após alguns milissegundos, o oscilograma de tensão do circuito Plasma indica que seu arco também foi afetado (pode ter acontecido uma migração do arco Plasma para o eletrodo MIG/MAG). Este fato também foi verificado por Oliveira (2006) soldando aço ao carbono. O autor sugere que no instante em que o arame está em curto com a peça, é constituído um caminho de menor impedância para a passagem da corrente do circuito Plasma. Também são observados no oscilograma de corrente no circuito Plasma dois intervalos de alguns milissegundos em que o arco Plasma foi extinto.

Normalmente, instabilidades deste tipo, resultam na extinção de um dos arcos e na conseqüente interrupção do processo. Quando o arco Plasma é extinto, o circuito MIG/MAG perde a estabilidade e pode acontecer transferência de metal para o eletrodo Plasma, como mostrado na Figura 4.4.

Provavelmente essas instabilidades não ocorreriam se a fonte fosse ajustada para operar com característica estática de tensão constante, já que o controle interno manteria o

comprimento do arco MIG/MAG praticamente constante através da variação da corrente do circuito MIG/MAG. No entanto, o programa “P-MIG”, ainda não oferece esta opção, no entanto, pode ser implementado para estudos futuros.

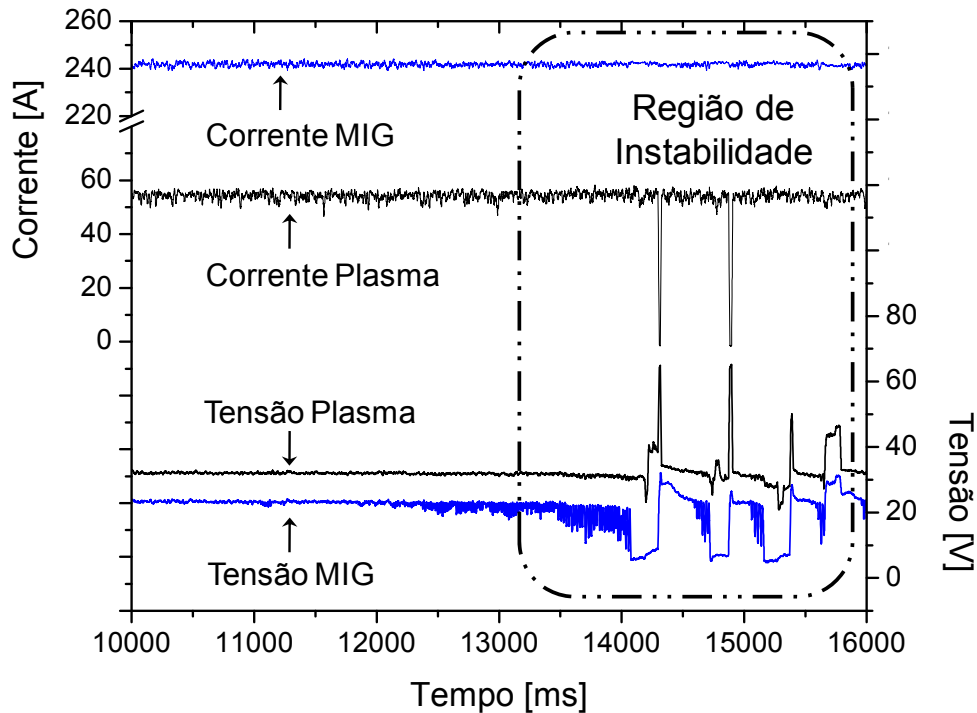


Figura 4.3 - Instabilidades causadas por curtos-circuitos entre o eletrodo consumível e a peça.

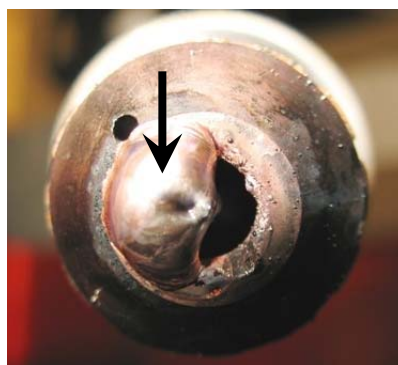


Figura 4.4 - Eletrodo Plasma danificado pela transferência de metal do eletrodo consumível para o eletrodo Plasma.

4.1.4 Refrigeração deficiente do eletrodo Plasma

Além das avarias que podem ser provocadas no eletrodo Plasma devido às instabilidades que podem vir a acontecer no processo, ele também sofre desgaste significativo se maiores valores de correntes (acima de 120 A) são utilizadas no circuito

Plasma, isto devido às altas temperaturas geradas na conexão anódica (eletrodo na polaridade positiva ou inversa). Para os primeiros testes utilizando a tocha Plasma-MIG, foram utilizados para retirar calor da tocha, apenas os sistemas de refrigeração das fontes de soldagem, que circulam água pela tocha. Esse sistema não é capaz de retirar calor da tocha na quantidade necessária para o seu bom funcionamento, além de não possuir a capacidade de fazer o controle da temperatura da água que é fornecida para o processo, como consequência, as partes da tocha ficam extremamente aquecidas e o processo de desgaste é acelerado.

Na Figura 4.5, está mostrado à esquerda, um eletrodo novo, que após uma seqüência de seis cordões, com uma corrente de 160 A pelo circuito Plasma, sofreu um desgaste significativo, como indicado pelas setas nas imagens. Observando ainda a última imagem da mesma figura, é possível visualizar que o dano identificado no eletrodo foi provocado pelas altas temperaturas geradas na conexão arco-eletrodo, já que o aspecto da avaria indica que ocorreu uma fusão localizada. Este fato ocorreu pela deficiência no sistema de refrigeração adotado para a tocha de soldagem.

Sendo assim, duas ações podem ser tomadas, a primeira é manter o sistema de resfriamento das fontes e utilizar baixos valores de corrente no circuito Plasma. A segunda é utilizar um sistema de refrigeração, com capacidade de controlar a temperatura de circulação da água em um nível abaixo da temperatura ambiente. Com um sistema de refrigeração, Oliveira (2006), conseguiu evitar a fusão do eletrodo e, também, utilizar gases ativos para o circuito MIG/MAG sem provocar danos significativos ao eletrodo Plasma.



Figura 4.5 – Aspecto de um eletrodo Plasma danificado por deficiência na refrigeração. Da esquerda para direita, eletrodo Plasma antes e após uma seqüência de seis cordões com 160 A de corrente pelo circuito Plasma.

Com o objetivo de minimizar o desgaste do eletrodo, foi então instalado um sistema de refrigeração, como descrito no capítulo de Procedimentos. Não foram realizados testes

com o objetivo específico de quantificar o quanto o sistema de refrigeração reduziu o desgaste das partes da tocha. No entanto, não foi mais observado o aspecto de fusão localizado no eletrodo Plasma, como mostrado na Figura 4. 5, outro ponto positivo, foi que os respingos que chegaram a entrar em contato com o eletrodo Plasma, tornaram fáceis de serem removidos. Como consequência imediata, maiores correntes puderam ser utilizadas no circuito Plasma sem prejuízos para a tocha.

4.2 Testes de soldabilidade

Com o objetivo de conhecer e familiarizar com a execução e o funcionamento processo, e de regular os parâmetros de abertura do arco (procedimento “Soft Start”), foi realizado um conjunto de quatro experimentos exploratórios, onde foi mantida a corrente MIG/MAG e variada a corrente Plasma.

Foi fixada uma condição para o processo MIG/MAG operando no modo corrente continua pulsada com os seguintes parâmetros: $I_b=100$ A; $I_p=280$ A; $t_b=8$ ms; $t_p=4,5$ ms, resultando numa corrente média de 165 A, esses valores foram baseados nas condições de UGPP (Uma Gota Por Pulso) obtidas por Miranda (2002). Para o circuito Plasma, foram testados quatro valores de corrente, situados na faixa de 60 e 180 A, esta escolha foi realizada com base na faixa de correntes avaliadas por Oliveira (2006). A velocidade de alimentação foi ajustada de forma a obter um comprimento de arco aproximadamente 4 mm para uma mesma relação Velocidade de Soldagem/Velocidade de Alimentação.

As condições gerais para a realização destas soldagens foram: Distância da Tocha a Peça em 8 mm, arame eletrodo de aço ao carbono AWS da classe ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, Ar+4%CO₂ como gás MIG/MAG a 5 l/min, Ar como gás Plasma a 5 l/min e Ar como gás de Proteção a 15 l/min. A condição específica de cada teste encontram-se na Tabela 4.1. Nesta tabela, V_{sold} é a velocidade de deslocamento da tocha e V_{lim} é a velocidade de alimentação do arame eletrodo Tanto V_{sold} como V_{lim} apresentados na tabela são valores já calibrados.

Na Figura 4.6 estão apresentadas as imagens das superfícies dos cordões de solda, cortados no centro do cordão de solda. O comprimento de cada cordão foi de aproximadamente 150 mm. Na Figura 4.7 é apresentada as fotografias das seções transversais dos testes indicados na Tabela 4.1. Os valores em cada imagem indicam os valores de correntes reguladas no circuito Plasma. A espessura da chapa corresponde a 9,5 mm.

Tabela 4.1 – Regulagem dos parâmetros de soldagem para os testes iniciais.

	Teste 4.1	Teste 4.2	Teste 4.3	Teste 4.4
I_{PLASMA} [A]	60	100	140	180
V_{sold} [m/min]	0,37	0,40	0,42	0,44
V_{lim} [m/min]	6,8	7,4	7,7	7,9
$(V_{\text{sold}}/V_{\text{lim}})*100$	5,44	5,41	5,45	5,44

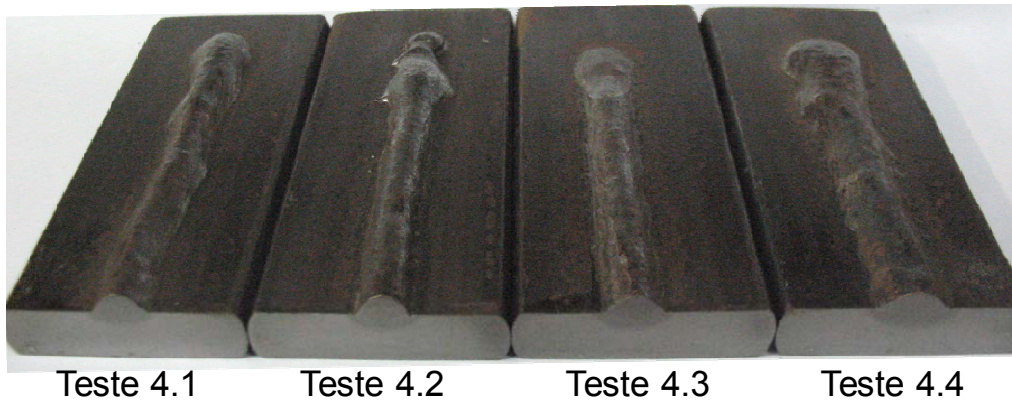


Figura 4.6 – Aspecto superficial dos corpos de prova conforme Tabela 4.1.

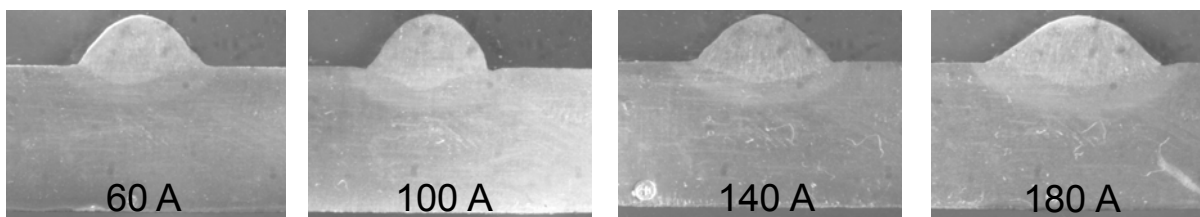


Figura 4.7 - Efeito da corrente Plasma na geometria dos cordões de solda. Espessura da chapa: 9,5 mm.

A partir das imagens apresentadas na Figura 4.7, os parâmetros geométricos foram medidos e os valores apresentados na Tabela 4.2. Para facilitar a visualização, os valores estão apresentados graficamente nas Figura 4.8 e Figura 4.9, que correspondem, respectivamente, aos valores geométricos lineares e quadráticos.

Tabela 4.2 – Parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda.

	Teste 4.1	Teste 4.2	Teste 4.3	Teste 4.4
Largura [mm]	8,34	7,71	9,05	11,27
Reforço [mm]	3,27	3,41	3,07	3,1
Penetração [mm]	1,25	1,56	1,45	1,56
Área Depositada [mm ²]	17,65	17,81	17,1	18,54
Área Fundida [mm ²]	5,74	6,4	7,96	9,57

A Figura 4.8 apresenta os gráficos de variação dos parâmetros geométricos lineares (largura, reforço e penetração) do cordão de solda em função da corrente Plasma.

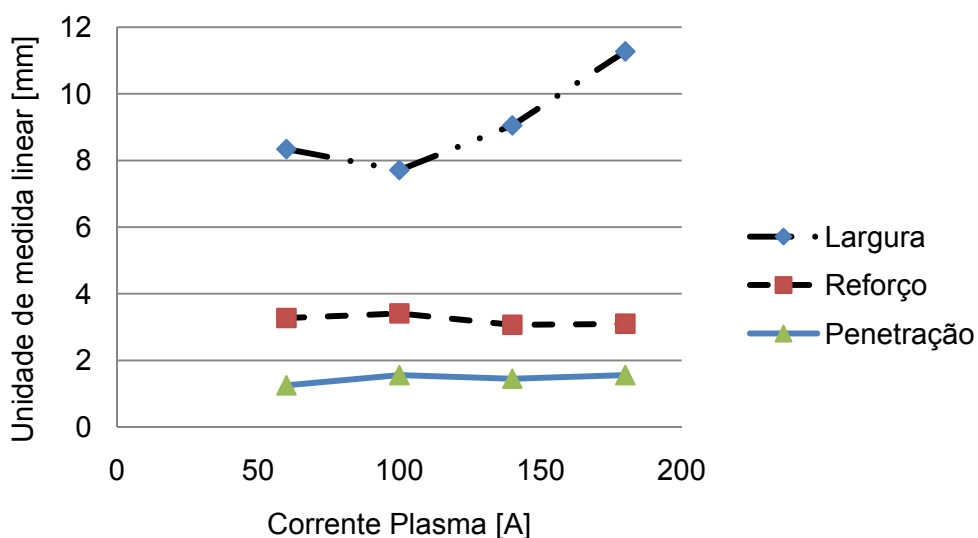


Figura 4.8 – Parâmetros geométricos lineares em função da corrente Plasma.

Apesar de serem ensaios preliminares, na Figura 4.8, já é possível observar uma leve redução na largura ao aumentar a corrente Plasma de 60 para 100 A, e a partir desse valor, ela aumenta com o aumento da corrente Plasma, indicando que quanto maior a corrente Plasma, maior é a molhabilidade da superfície da chapa. Quanto ao reforço, pode ser observada uma pequena redução, com o aumento da corrente Plasma. Já a penetração sofreu pequena influência.

A Figura 4.9 apresenta os gráficos de variação dos parâmetros geométricos quadráticos (área depositada e área fundida) do cordão de solda em função da corrente Plasma.

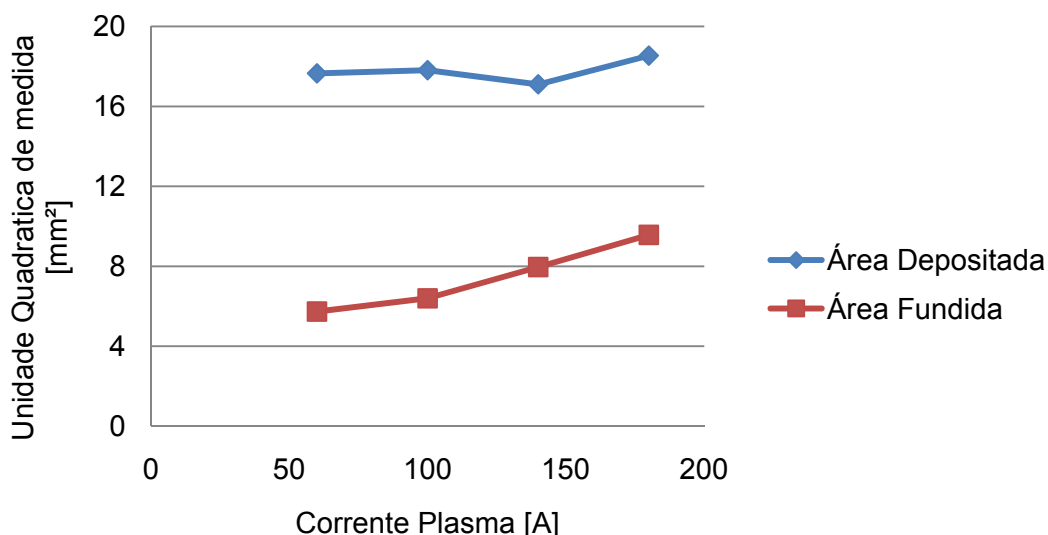


Figura 4.9 – Parâmetros geométricos de área em função da corrente Plasma.

Na Figura 4.9, é verificada uma pequena variação no valor da área depositada. Como os experimentos foram realizados para uma relação entre a velocidade de soldagem e velocidade de alimentação constante, esse parâmetro deveria ter permanecido constante. No entanto, as pequenas variações podem ser causadas por oscilações na velocidade de alimentação do arame eletrodo, por respingos ou até mesmo por evaporação de metal. Ainda na mesma figura, pode ser observado um aumento da área fundida em função da corrente Plasma, que deve ser um resultado direto da maior quantidade de calor incidindo sobre a chapa.

4.3 Considerações finais do capítulo

Tendo em vista as condições experimentais empregadas neste capítulo, os resultados e observações mostraram que:

- Curtos-circuitos entre o eletrodo consumível e a peça desestabilizam o circuito MIG/MAG, e por consequência, o arco Plasma, podendo este último ser extinto e interromper o processo;

- O sistema de refrigeração deve ter uma capacidade suficiente para retirar o calor gerado pelo arco e transferido a tocha, além de controlar a temperatura com que a água é enviada ao processo;
- A variação na corrente Plasma atuou sobre os parâmetros geométricos do cordão de solda, principalmente na largura e área fundida.

CAPÍTULO V

INFLUÊNCIA DAS CORRENTES PLASMA E MIG/MAG SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Neste capítulo são apresentados resultados referentes à avaliação da influência da energia de soldagem (quantidade de energia gerada no arco por unidade de comprimento da solda) e do balanço das correntes dos circuitos Plasma e MIG/MAG sobre os aspectos geométricos dos cordões de solda tais como: largura, reforço, penetração, área fundida e área depositada, de forma a contemplar parte dos objetivos propostos no Capítulo 1.

5.1 Procedimento experimental

Para avaliar a influência das correntes dos circuitos Plasma e MIG/MAG na geometria do cordão de solda, foram realizadas soldagens de simples deposição sobre chapa (*"bead on plate"*), com ambas as fontes reguladas para operar em polaridade positiva (CC+ ou polaridade inversa) e com característica estática corrente constante. Optou-se por trabalhar com valores de corrente MIG/MAG acima da transição globular-goticular em três níveis (200, 240 e 280 A). Para a corrente Plasma, também foram avaliados três níveis (0, 60 e 100 A), que combinados com a corrente do MIG/MAG, resultaram em nove condições de soldagem a serem avaliadas.

Como o valor da velocidade de alimentação varia com a corrente Plasma e, principalmente, com a corrente MIG/MAG, a velocidade de soldagem também foi regulada para cada experimento de forma que a relação Velocidade de Soldagem/Velocidade de Alimentação fosse mantida constante. A velocidade de alimentação foi regulada para cada

condição, de maneira que o arco MIG/MAG permanecesse o mais curto possível, com um comprimento de aproximadamente 4 mm. Esta regulagem foi realizada aumentando-se a velocidade de alimentação até que o arame tocasse na poça gerando curtos-circuitos, a partir desse ponto, a velocidade de alimentação era reduzida suavemente até que os curtos-circuitos deixassem de existir (lembrar que se trata de transferência goticular com curto-circuito entre a ponta do arame e a poça, não confundir com transferência por curto-circuito). Como a variação na velocidade de soldagem altera o volume da poça e conseqüentemente o tamanho do arco, as regulagens tanto da velocidade de soldagem quanto de alimentação foram feitas de forma interativa para que a relação entre elas fosse constante e o arco o mais curto possível. A relação *Velocidade de Soldagem/Velocidade de Alimentação* foi mantida constante e igual a 6×10^{-2} , para possibilitar a comparação entre um mesmo volume de material depositado, para diferentes combinações entre as correntes dos circuitos Plasma e MIG/MAG.

As condições gerais para a realização destas soldagens foram: Distância da Tocha a Peça em 8 mm, DBCP de 25 mm, arame eletrodo de aço ao carbono ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, Ar como gás MIG/MAG a 5 l/min, Ar como gás Plasma a 5 l/min e Ar+8%CO₂ como gás de Proteção a 15 l/min. As condições específicas para cada ensaio encontram-se na Tabela 5.1. Nesta tabela, I_{MIG} e I_{PLASMA} , correspondem às correntes de referência ajustadas no programa 'P-MIG' para as fontes operando no modo corrente constante, Vsold é a velocidade de deslocamento da tocha e Valim é a velocidade de alimentação do arame eletrodo. Tanto Vsold como Valim apresentados na tabela são valores já calibrados.

Tabela 5.1 – Ajustes das condições de soldagem para os testes iniciais.

Ensaio	$I_{MIG/MAG}$ [A]	I_{PLASMA} [A]	Vsold [m/min]	Valim [m/min]
5.1	200	0	0,30	5,0
5.2	200	60	0,42	7,1
5.3	200	100	0,45	7,4
5.4	240	0	0,44	7,3
5.5	240	60	0,65	10,8
5.6	240	100	0,67	11,2
5.7	280	0	0,53	8,8
5.8	280	60	0,77	12,7
5.9	280	100	0,80	13,0

Os ensaios 5.1, 5.4 e 5.7 foram realizados sem corrente no circuito Plasma, ou seja, trata-se de soldagem MIG/MAG com corrente constante utilizando a tocha Plasma-MIG. Estes ensaios são os pontos de referência para verificar a influência da corrente Plasma no processo e, principalmente, na geometria do cordão. Estes ensaios foram realizados com a fonte Plasma desligada, conseqüentemente o procedimento 'Soft Start' não foi utilizado e os parâmetros MIG/MAG foram ajustados diretamente no painel de controle da Fonte. Tal procedimento foi executado para garantir que a corrente MIG/MAG circulasse somente através do seu arco, uma vez que se o procedimento 'Soft Start' for utilizado com a corrente Plasma ajustada em 0 A (zero A), a fonte Plasma permanece com tensão em vazio durante a soldagem e uma pequena parcela da corrente MIG/MAG circula através circuito Plasma. Os demais testes foram realizados com corrente no circuito Plasma e com a utilização do "Soft Start".

5.2 Resultados

Na Tabela 5.2 estão apresentados os valores médios, com seus respectivos desvios padrões, dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos Plasma e MIG/MAG para cada um dos experimentos apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.2 – Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos Plasma e MIG/MAG.

Ensaio	$I_{MIG/MAG}$ [A]	$U_{MIG/MAG}$ [V]	I_{PLASMA} [A]	U_{PLASMA} [V]
5.1	200,7 $\pm$ 4,0	30,4 $\pm$ 2,0	*	*
5.2	202,1 $\pm$ 4,0	27,6 $\pm$ 3,0	55,1 $\pm$ 7,5	37,5 $\pm$ 3,5
5.3	201,4 $\pm$ 4,0	29,6 $\pm$ 3,0	93,2 $\pm$ 7,5	33,1 $\pm$ 4,5
5.4	240,4 $\pm$ 4,0	28,7 $\pm$ 2,0	*	*
5.5	241,6 $\pm$ 4,0	27,7 $\pm$ 5,0	54,8 $\pm$ 5,0	36,4 $\pm$ 7,0
5.6	242,1 $\pm$ 4,0	24,5 $\pm$ 3,5	94,2 $\pm$ 7,5	30,8 $\pm$ 2,0
5.7	279,3 $\pm$ 4,0	28,9 $\pm$ 1,5	*	*
5.8	281,5 $\pm$ 4,0	25,0 $\pm$ 2,5	55,3 $\pm$ 4,5	33,4 $\pm$ 2,0
5.9	281,1 $\pm$ 4,0	24,1 $\pm$ 2,0	94,2 $\pm$ 5,0	30,8 $\pm$ 2,0

Nota: (*) indica que os experimentos foram realizados com a fonte Plasma desligada.

Após a execução dos ensaios da Tabela 5.1, os corpos de prova foram devidamente identificados para posterior análise. Como cada cordão de solda tem um comprimento de aproximadamente 150 mm, as seções transversais foram realizadas em duas posições, um corte no meio e um a aproximadamente 30 mm do final do cordão, como indicado no capítulo de procedimentos e na Figura 5.1, os corpos de prova foram então lixados e atacados com Nital 5% para revelar as macrografias dos mesmos.

A Figura 5.1 mostra a imagem da superfície do corpo de prova referente ao Teste 5.6. Vale ressaltar a grande quantidade de óxido presente na região do cordão, que foi observada nos demais corpos de prova referentes a esse conjunto de testes.

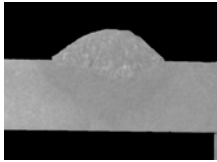
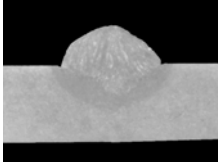
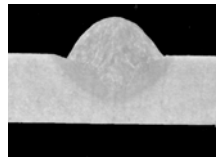
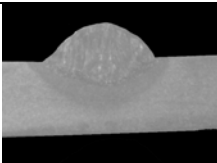
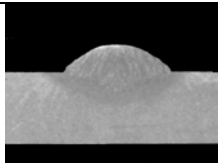
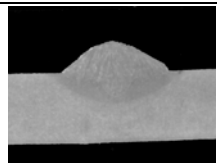
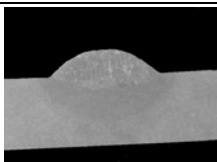
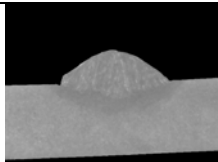
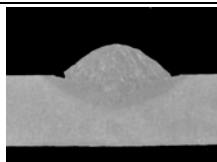


Figura 5.1 – Fotografia da superfície da chapa referente ao Teste 5.6, com indicação da direção de soldagem e das regiões onde foram realizadas as seções transversais.

Na Tabela 5.3, estão mostradas as fotografias das seções transversais de cada corpo de prova. Como a espessura das chapas está visível, o leitor pode utilizá-las como escala e seu valor é correspondente a 6,35 mm.

Para as medidas dos parâmetros geométricos da seção transversal dos corpos de prova foi utilizado o programa gratuito ImageJ, que permite a realização de medidas lineares e de área. Dentre outras funções (disponível no site: <http://rsb.info.nih.gov/ij/download/>), um guia para utilização do programa é apresentado no Anexo B. Os parâmetros geométricos foram medidos de acordo com o esquema indicado na Figura 3.18, do Capítulo de Procedimentos.

Tabela 5.3 – Seções transversais de cada corpo de prova, as imagens referentes à seção mais próxima ao fim do cordão. Chapas com 6,35 mm de espessura.

Ensaio		Ensaio		Ensaio	
5.1		5.4		5.7	
5.2		5.5		5.8	
5.3		5.6		5.9	

Os valores médios dos parâmetros geométricos do cordão de solda com os respectivos desvios padrões estão apresentados na Tabela 5.4. Os valores de todos os parâmetros medidos encontram-se no Anexo D. Para melhorar a apresentação dos resultados e facilitar a análise do comportamento do processo, esses parâmetros foram dispostos individualmente em forma de gráficos, primeiramente em função das Energias de Soldagem, que correspondem às Figuras 5.2 até 5.5, e posteriormente em função das correntes de soldagem, que corresponde às Figuras 5.6 a 5.11. Na sequência de cada gráfico seguem as discussões e comentários pertinentes.

Tabela 5.4 – Parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda.

Ensaio	L [mm]	R [mm]	P[mm]	AF [mm ²]	AD [mm ²]
5.1	9,3 ^{±0,10}	2,8 ^{±0,05}	1,7 ^{±0,10}	8,7 ^{±0,25}	18,5 ^{±0,40}
5.2	9,6 ^{±0,15}	2,5 ^{±0,15}	1,4 ^{±0,10}	9,1 ^{±0,60}	19,0 ^{±0,50}
5.3	9,8 ^{±0,10}	2,3 ^{±0,15}	1,1 ^{±0,05}	8,1 ^{±0,40}	16,0 ^{±2,05}
5.4	8,4 ^{±0,35}	2,9 ^{±0,25}	2,6 ^{±0,10}	11,9 ^{±0,50}	18,7 ^{±1,50}
5.5	9,3 ^{±0,10}	2,4 ^{±0,15}	1,7 ^{±0,15}	8,0 ^{±0,65}	17,0 ^{±0,10}
5.6	9,4 ^{±0,30}	2,6 ^{±0,10}	1,5 ^{±0,25}	7,0 ^{±0,40}	15,9 ^{±0,60}
5.7	8,4 ^{±0,10}	3,3 ^{±0,15}	3,0 ^{±0,30}	12,2 ^{±2,40}	18,7 ^{±0,10}
5.8	9,2 ^{±0,10}	2,6 ^{±0,10}	2,2 ^{±0,05}	8,8 ^{±0,60}	16,9 ^{±1,40}
5.9	9,5 ^{±0,15}	2,6 ^{±0,25}	2,2 ^{±0,10}	9,2 ^{±1,50}	15,8 ^{±0,80}

Nota: L = Largura, R = Reforço, P=Penetração, AF = Área Fundida, AD = Área Depositada.

Para verificar se as medidas dos parâmetros geométricos do cordão de solda são de fato afetados pelas correntes Plasma e MIG/MAG, foi realizada uma análise de variância. Na Tabela 5.5, estão apresentados os níveis de significância “p” obtidos pelo teste de variância ANOVA. A análise foi feita a partir dos resultados de todas as medidas de geometria. Pelos valores encontrados, percebe-se que a corrente no circuito Plasma afeta com uma certeza de 99%, todos os parâmetros geométricos. A corrente no circuito MIG/MAG afeta com uma certeza de 99% a largura e a penetração, com uma certeza de 95% o reforço e 92% para a área fundida.

Tabela 5.5 - Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.

Variáveis Fatores (Correntes)	Largura	Reforço	Penetração	Área Fundida
MIG/MAG	< 0,01	0,05	< 0,01	0,08
Plasma	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Na sequência, será apresentada uma análise para cada parâmetro medido em função da energia de soldagem e em função das correntes em cada um dos circuitos.

5.3 Análise dos parâmetros do cordão de solda em função da energia de soldagem

Como apresentado anteriormente, o processo Plasma-MIG é composto basicamente de dois circuitos, o Plasma e o MIG/MAG. Os valores monitorados de corrente e tensão apresentados na Tabela 5.2, estão apresentados na Tabela 5.6 como valores de Potência consumida pelo processo e Energia de Soldagem.

Nascimento et al. (2007), em suas revisão da literatura, mostram que existem divergências quanto aos métodos de cálculo de potência do arco. O mais comum é o da Potência Média Aritmética, no qual o cálculo é feito através do produto dos valores médios de tensão e corrente ($P_{arit} = U_{arit} \times I_{arit}$). Um segundo método (Potência Eficaz) utiliza a média dos valores RMS de tensão e corrente ($P_{RMS} = U_{RMS} \times I_{RMS}$). Outro método, menos aplicado é o da Potência Instantânea, sendo adotada, neste caso, a média aritmética da multiplicação da tensão pela corrente feita pontualmente ($P_{inst} = (\sum U_i \times I_i)/n$). Além desses métodos, comumente encontrados na literatura, os autores propuseram um quarto método para o cálculo da potencia do arco, que seria o método da Potência Instantânea RMS, obtida através do valor RMS do produto da tensão e corrente pontuais ($P_{InstRMS} = (\sum (U_i \times I_i)^2/n)^{1/2}$).

Os autores Nascimento et al. (2007) compararam os valores de potência calculados pelos diferentes métodos para diferentes modos de transferência metálica, e nos modos curto-circuito e pulsada, foram encontradas as maiores diferenças em relação ao cálculo pela Potência Instantânea, que é o método correto para o cálculo da potência. No entanto, quando os mesmos fizeram os cálculos para os modos globular e goticular, as diferenças entre os métodos de cálculo foram mínimas.

Uma vez que o presente trabalho foi realizado nas condições de transferência goticular, a Potência consumida foi calculada pelo método mais simples, que é o da potencia média aritmética para cada um dos circuitos (Plasma e MIG/MAG) de acordo com a Equação 1.

$$Potência\ Consumida = I_{Plasma} * U_{Plasma} + I_{MIG/MAG} * U_{MIG/MAG} \quad (Equação\ 1)$$

Sendo que 1 watt = 1 Joule/s, se a Potência consumida for dividida pela velocidade de soldagem, é obtida a energia consumida pelo processo por unidade de comprimento de solda, chamada de energia de soldagem. Os valores calculados estão na tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Potência Consumida e Energia de Soldagem.

Ensaio	Valim [m/min]	Potência Consumida (Watts)	Energia de Soldagem (kJ/cm)
5.1	5,0	6082,56	33,79
5.2	7,1	7644,21	30,33
5.3	7,4	9046,36	33,50
5.4	7,3	6884,37	26,07
5.5	10,8	8687,04	22,27
5.6	11,2	8832,81	21,97
5.7	8,8	8052,33	25,32
5.8	12,7	8884,52	19,23
5.9	13,0	9675,87	20,15

Na Figura 5.2 é apresentado o gráfico da variação da Energia de Soldagem em função da velocidade de alimentação de arame eletrodo. Para a curva correspondente à corrente Plasma de 0 A (Processo MIG/MAG) observa-se que *quando o valor da velocidade de alimentação (corrente) é aumentada a energia de soldagem necessária para depositar a mesma quantidade de material por unidade de comprimento diminui, isto para uma relação entre velocidade de soldagem e alimentação constante*. Silva (2003) utilizou o processo MIG/MAG com a técnica de pulsação térmica na soldagem de alumínio, também mantendo

a relação entre a Velocidade de Soldagem e Velocidade de Alimentação constante. Apesar da autora não ter realizado os cálculos de energia de soldagem é possível observar a mesma tendência apresentada neste trabalho.

Verifica-se que a inserção da corrente Plasma no processo mantém a mesma tendência, com o diferencial de que a curva é deslocada no sentido de aumentar a velocidade de alimentação com o aumento da corrente Plasma, já que o arco Plasma também interfere no consumo do eletrodo.

Deve ser observado que a energia de soldagem é afetada tanto pela potência gerada no arco (UxI), quanto pelo valor da velocidade de soldagem. Portanto, uma variação na corrente de soldagem interfere no valor da velocidade de alimentação do eletrodo consumível, que por sua vez, altera o valor da velocidade de soldagem (utilizado no cálculo da energia de soldagem) já que a relação entre velocidade de soldagem e de alimentação é mantida constante. Ou seja, a variação na corrente afeta ao mesmo tempo o cálculo da potência e da velocidade de soldagem, que afetam em sentidos opostos o cálculo da energia de soldagem. Com isso, o leitor deve estar atento para não tirar conclusões distorcidas já que a *Figura 5.2 compara dois parâmetros com forte interação*.

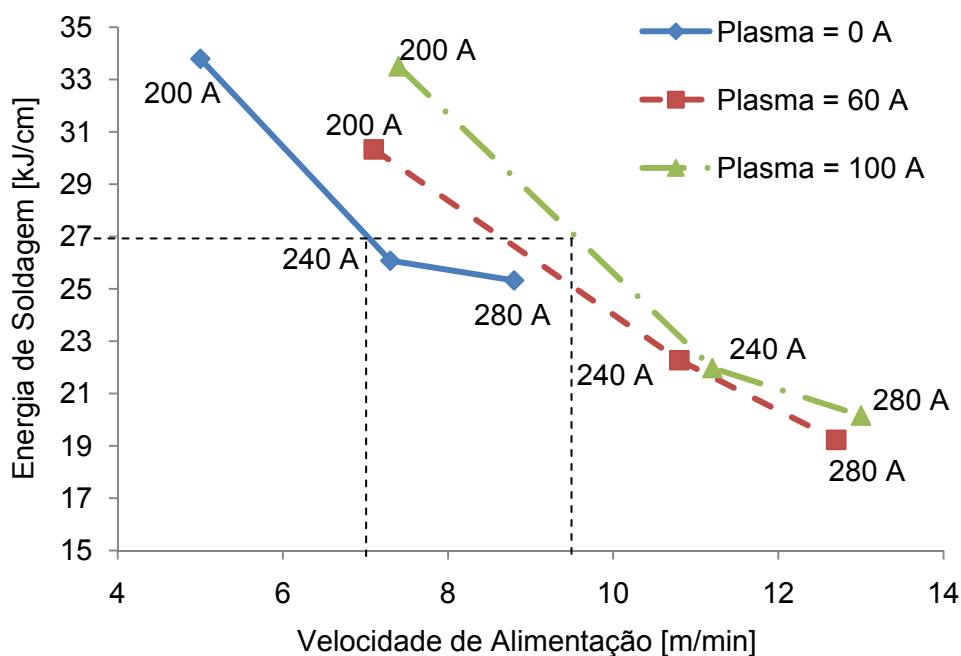


Figura 5.2 – Energia de Soldagem em função da velocidade de alimentação para uma mesma quantidade de material depositada por unidade de comprimento e mesmo comprimento de arco. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG. Ficar atento ao fato de haver uma forte interação entre os parâmetros comparados.

É possível verificar uma independência entre a energia de soldagem e a quantidade de material depositado, assim como foi anteriormente observado por Oliveira (2006). Por exemplo, para uma energia de soldagem de 27 kJ/cm (Figura 5.2), tem-se que para uma corrente Plasma de 0 A, o arame eletrodo é consumido a uma velocidade de aproximadamente 7 m/min, já para uma corrente Plasma de 100 A, a velocidade do arame eletrodo é de aproximadamente 9,5 m/min, resultando numa diferença considerável de 2,5 m/min.

Considerando a densidade do aço carbono como sendo 7,8 g/cm³, um metro de arame de 1,2 mm possui uma massa de 8,82 gramas, o que significa dizer que para uma velocidade de alimentação de 7 m/min, são depositados 3,7 kg/h de material, e para uma velocidade de 9,5 m/min, são depositados 5,02 kg/h, o que significa dizer que o processo Plasma-MIG, operando numa mesma energia de soldagem, foi capaz de depositar 1,32 kg/h a mais de material. No entanto, essa avaliação não considera as diferenças de rendimentos que certamente são diferentes.

A Figura 5.3 apresenta um gráfico da variação da largura do cordão em função da variação da Energia de Soldagem. Neste gráfico, é possível observar que a presença de corrente no circuito Plasma é capaz de promover uma melhor molhabilidade no cordão de solda, refletindo num ganho de largura para uma mesma energia de soldagem em relação ao processo MIG/MAG (Plasma = 0 A). Entretanto, a diferença é maior entre os pontos com Plasma igual a 0 A (MIG/MAG) e o Plasma de 60 A (Plasma-MIG), entre os valores de Plasma igual a 60 e 100 esta mudança é menor.

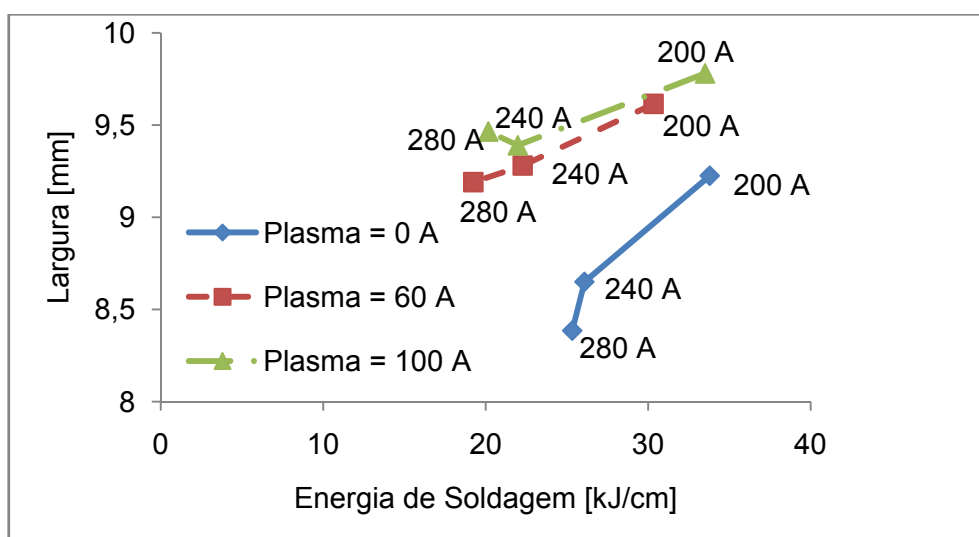


Figura 5.3 – Largura do cordão em função da Energia de Soldagem. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.

A Figura 5.4 apresenta um gráfico da variação do reforço do cordão em função da Energia de Soldagem. Neste gráfico, é observado que a presença de corrente no circuito Plasma diminui o reforço dos cordões em relação ao processo MIG/MAG (Plasma = 0 A). Também nesta figura, a diferença é maior entre os pontos com Plasma igual a 0 A (MIG/MAG) e o Plasma de 60 A (Plasma-MIG), entre os valores de Plasma igual a 60 e 100 esta mudança é menor.

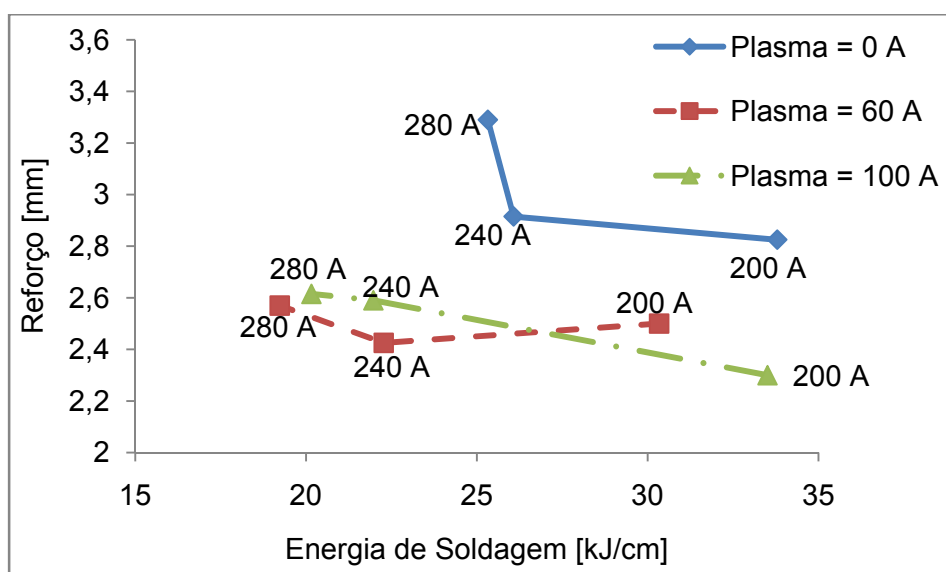


Figura 5.4 – Reforço do cordão em função da Energia de Soldagem. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.

A Figura 5.5 apresenta um gráfico da variação da penetração do cordão em função da Energia de Soldagem. Este gráfico indica que a presença de corrente no circuito Plasma diminui a penetração dos cordões para uma mesma energia de soldagem em relação ao processo MIG/MAG (Plasma = 0 A). Novamente, a diferença é maior entre os pontos com Plasma igual a 0 A (MIG/MAG) e o Plasma de 60 A (Plasma-MIG), entre os valores de Plasma igual a 60 e 100 esta mudança é menor.

Continuando na mesma figura, existe um ponto muito importante a ser observado, e que pode ser utilizado para embasar uma justificativa em termos econômicos para a aplicação do processo Plasma-MIG na indústria. Para obter uma mesma penetração, o Processo Plasma-MIG utilizou uma energia total inferior ao processo MIG/MAG (Plasma = 0 A), lembrando que os rendimentos não foram considerados. No entanto, o processo Plasma-MIG parece apresentar um melhor rendimento térmico. Provavelmente este maior rendimento está no arco do circuito MIG/MAG, que neste caso é “protegido” pelo arco Plasma contra as perdas de energia para o ambiente. Esta é apenas uma suposição que merece uma investigação futura com maiores detalhes.

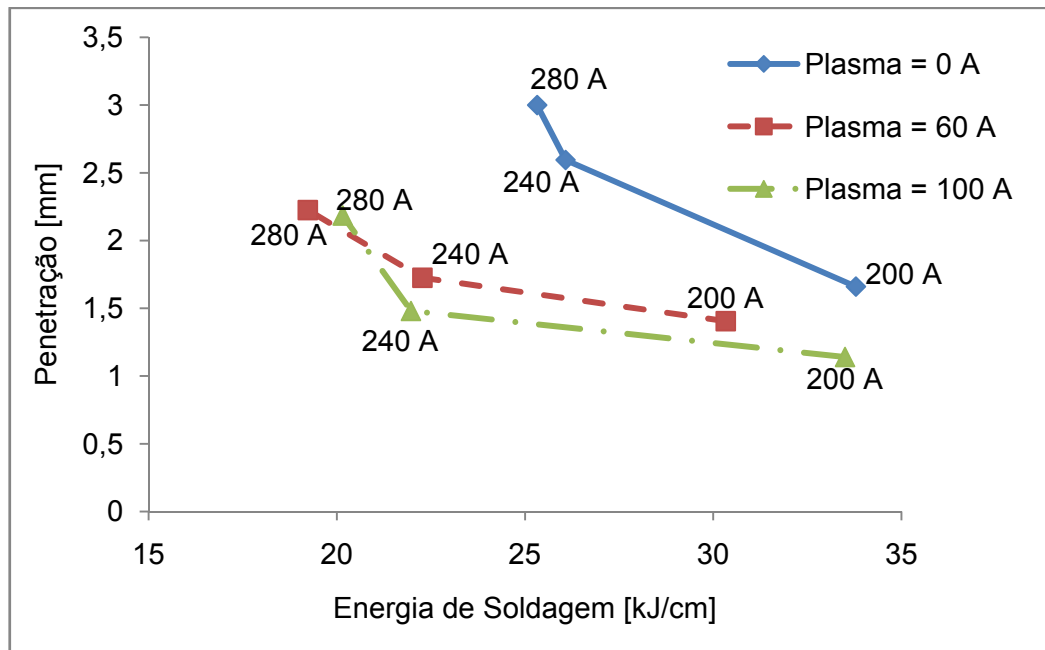


Figura 5.5 – Penetração do cordão em função da Energia de Soldagem. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.

A Figura 5.6 apresenta um gráfico da variação da área fundida no metal de base em função da Energia de Soldagem. Neste gráfico, é observado que a presença de corrente no circuito Plasma diminui a área fundida no metal de base em relação ao processo MIG/MAG (Plasma = 0 A). Por consequência, a diluição também é reduzida.

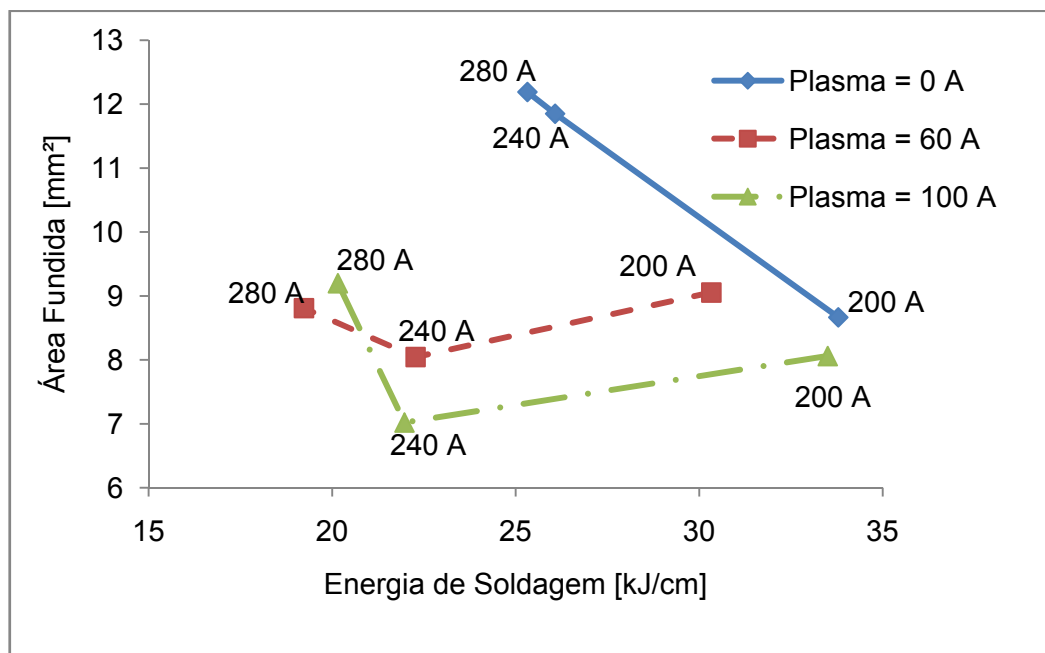


Figura 5.6 – Área fundida do cordão em função da Energia de Soldagem. Os valores em cada ponto correspondem ao valor da corrente no circuito MIG/MAG.

5.4 Análise dos parâmetros do cordão de solda em função das correntes Plasma e MIG/MAG

Na sequência são apresentados os gráficos das variações dos parâmetros geométricos em função das correntes nos circuitos Plasma e MIG/MAG. Na Figura 5.7 é apresentada a variação da penetração do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente Plasma. O teste com corrente Plasma igual a zero, corresponde a uma solda MIG/MAG utilizando a tocha Plasma-MIG.

Observa-se na Figura 5.7 um aumento na penetração com o aumento da corrente MIG/MAG, que pode ser justificado pelo aumento da pressão que o jato de plasma exerce sobre a poça fundida devido à maior densidade de corrente no arco elétrico. Outro fato, observado por Rodrigues (2007) soldando com o processo MIG/MAG convencional, é que maiores correntes resultam em gotas com maiores velocidades, o que pode ter contribuído para uma maior penetração.

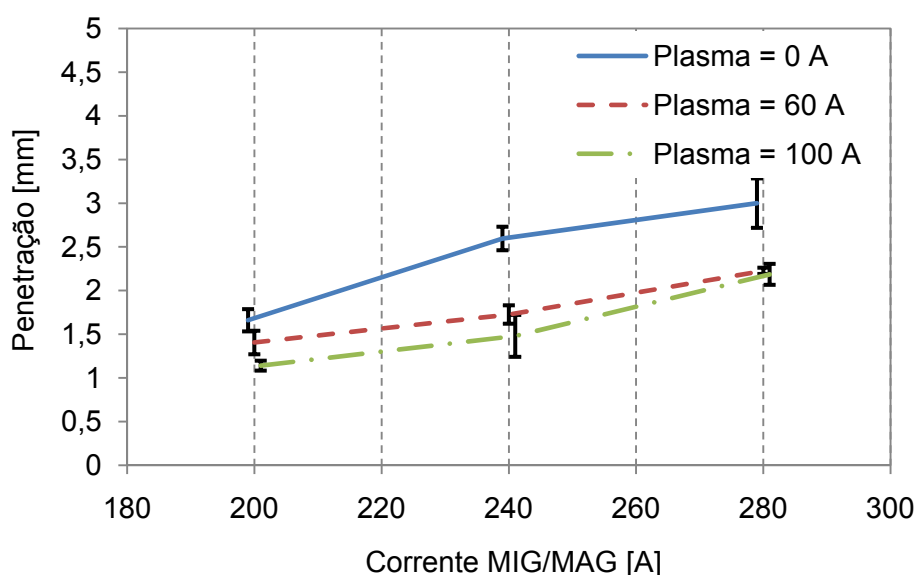


Figura 5.7 – Penetração do Cordão de Solda em Função da Corrente MIG/MAG para três condições de Corrente Plasma.

Ainda na Figura 5.7, é observada uma tendência de reduzir a penetração do cordão de solda ao inserir corrente no circuito Plasma. Um fenômeno que pode estar contribuindo para a redução na penetração é a diminuição da quantidade de movimento das gotas (massa x velocidade). Rodrigues (2007) mostrou que a redução da quantidade de movimento reduz a penetração, no entanto, o autor fez a avaliação para o processo MIG/MAG convencional. Como a imposição de corrente no circuito Plasma aumenta